O. FLOREA
V. JINESCU
A. STAMATA

Operații, utilaje și aparate de măsurat în chimie

MANUAL PENTRU LICEE INDUSTRIALE
CU PROFIL DE CHIMIE, CLASA X

EDITURA DIDACTICĂ
ȘI PEDAGOGICĂ
BUCUREȘTI — 1977

Scanned with OKEN Scanner

Dr. ing. O. FLOAREA
Dr. ing. V. JINESCU
Dr. ing. A. STAMATA

Operații utilaje și aparate de măsurat în chimie

MANUAL PENTRU LICEE INDUSTRIALE
CU PROFIL DE CHIMIE, ANUL II

EDITURA DIDACTICĂ
ȘI PEDAGOGICĂ,
BUCUREȘTI — 1977

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul I

NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Ritmul accelerat de dezvoltare a industriei chimice, schimbarea continuă a proceselor, tehnologiilor și a utilajelor au impus, pentru pregătirea specialiștilor din acest domeniu, renunțarea la acumularea de date empirice și cunoștințe de detaliu și generalizarea a cît mai multor informații care să poată fi aplicate în fabricații și tehnologii mai mult sau mai puțin comune, cunoscute sau încă necunoscute.

1. OPERAȚII UNITARE

Operații unitare în industria chimică. Cu toată varietatea mare a proceselor tehnologice din industria chimică, acestea pot fi împărțite în faze sau operații distincte, care, deși aparțin unor fabricații diferite, pot fi definite prin caracteristicile și natura lor comună. Astfel, dacă se analizează schemele proceselor tehnologice din diferite ramuri ale industriei chimice, se constată că, în afara unor faze chimice specifice fiecărei fabricații în parte, acestea însumează o serie de operații distincte, cum sînt: transportarea materialelor, măcinarea, separarea, amestecarea, încălzirea, evaporarea, distilarea, uscarea, absorbția etc. Aceste operații comune mai multor fabricații se numesc *operații unitare* sau *operații tip*. Aceste operații unitare se desfășoară pe utilaje asemănătoare, indiferent de procesul tehnologic căruia îi aparțin. Deci, calculul, proiectarea și exploatarea acestor utilaje se vor baza pe aceleași principii fundamentale, anumite diferențieri neesențiale datorîndu-se condițiilor de lucru specifice fiecărei fabricații.

Studiul operațiilor unitare (în număr de cîteva zeci) permite însușirea elementelor fundamentale necesare calculului și exploatării tuturor fabricațiilor, fără a studia în mod amănunțit toate procesele tehnologice (cîteva zeci de mii).

Specialistul astfel pregătit va fi întotdeauna în măsură să-și însușească și să conducă o fabricație oricît de nouă, să contribuie permanent la perfecționarea procesului tehnologic și la îmbunătățirea calității produselor.

Clasificarea operațiilor unitare. Se obișnuiește ca operațiile unitare să se clasifice după natura și după legile fizice generale care stau la baza lor. Din acest punct de vedere se obține următoarea clasificare:

— operații mecanice: mărunțirea materialelor, transportul solidelor, depozitarea, clasarea, sortarea;

— operații hidrodinamice: transportul fluidelor, amestecarea, filtrarea, sedimentarea;

Scanned with OKEN Scanner

— operaţii termice: încălzirea, răcirea, fierberea, condensarea, evaporarea;

— operaţi de difuziune: distilarea şi rectificarea, absorbţia, extracţia, uscarea, cristalizarea, sublimarea.

Această clasificare serveşte mai mult la sistematizarea studiului operaţiilor unitare, deoarece unele operaţii pot fi trecute fără nici o greşeală dintr-o categorie într-alta. Multe operaţii de difuziune (distilarea, uscarea, cristalizarea) sînt în acelaşi timp operaţii termice, iar unele termice (evaporarea) sînt însoţite de schimb de substanţă (difuziunea); de asemenea, operaţiile termice şi de difuziune sînt în acelaşi timp şi operaţii hidrodinamice.

2. ELEMENTE DE CALCUL TEHNIC

În activitatea de producţie sau în laboratorul de cercetare, trebuie urmărite randamentele de fabricaţie, consumul de materii prime şi calculate valorile unor mărimi care influenţează sau intervin direct în procesul tehnologic. Pentru aceasta se pot utiliza uneori tabele şi grafice, funcţii sau formule empirice.

a. Utilizarea tabelelor

Redarea relaţiei dintre două sau mai multe variabile sub formă de tabelă este indicată, în special, atunci cînd la stabilirea relaţiei respective serveşte numai un singur caz — în general, cazul din care au rezultat valorile numerice ce urmează a fi tabelate. Un astfel de caz se prezintă la etalonarea unui aparat sau la controlul unor condiţii de funcţionare ale unui utilaj. În tabela 1 sînt redate — spre exemplu — rezultatele obţinute la determinarea pierderilor de presiune la trecerea aerului prin orificiile talerului unei coloane de absorbţie. La diferite valori ale vitezei gazului s-a măsurat, cu un manometru, pierderea de presiune corespunzătoare.

Tabelele sînt folosite mult pentru rezumarea şi sintetizarea numerică a activităţii de producţie, pentru întocmirea bilanţelor necesare determinării consumurilor specifice de materiale, de energie şi de utilităţi.

Tabela 1

Variaţia vitezei gazului cu pierderea de presiune

Pierderea de presiune Δp, în daN/m²	5,5	6,0	10,10	15,0	24,5	34,0	46,00	60,0	75,4	89,5
Viteza gazului, w_0, în m/s	3,0	7,10	9,10	11,10	14,20	17,00	19,20	22,30	24,8	28,6

Scanned with OKEN Scanner

b. Utilizarea graficelor

Spre deosebire de tabele, care permit doar observarea sensului de variaţie a valorilor mărimilor tabelate, graficele (diagrame şi nomograme) permit o reprezentare continuă, într-un interval dat, a relaţiilor dintre două sau mai multe variabile.

Construirea şi folosirea diagramelor. Cu ajutorul diagramelor se prezintă grafic, într-un sistem de axe rectangulare, interdependenţa dintre două sau trei variabile; pentru mai multe variabile, în vederea simplificării reprezentării şi mărimii preciziei de citire, se recurge la nomograme.

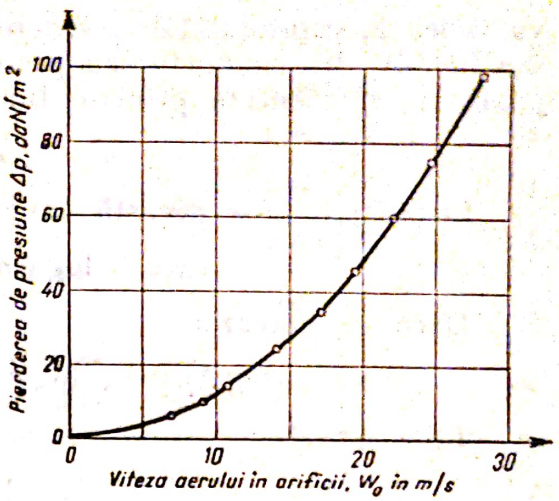


Fig. 1. Reprezentarea grafică a datelor experimentale din tabela 1, printr-o diagramă liniară.

În construirea unei diagrame se întîlnesc următoarele etape principale:

— *Notarea axelor de coordonate.* Pe axele de coordonate se notează: denumirea variabilelor care se reprezintă, simbolul utilizat şi dimensiunile în care se exprimă mărimile respective. De exemplu: pierderea de presiune Δp, în daN/cm²; viteza w_0, în m/s.

— *Alegerea modulului scărilor pentru divizarea axelor de coordonate.* Modulul unei scări este lungimea care corespunde unităţii de măsură a mărimii reprezentate. De exemplu, în diagrama din figura 1 s-au luat următoarele module: pe scara presiunilor (ordonata) 1 daN/m² corespunde la 0,5 mm, iar pe scara vitezelor (abscisa) 1 m/s corespunde la 2 mm; în acest caz se spune că modulul scărilor este 0,5 mm/daN/m² şi respectiv, 2 mm/m/s. La alegerea modulului se ţine seama de precizia de citire a diagramei şi de uşurinţa divizării axelor.

— *Marcarea diviziunilor.* Pe axele de coordonate se marchează numai diviziuni care corespund valorilor întregi ale mărimilor reprezentate.

Marcarea punctelor corespunzătoare datelor de care se dispune.

— *Trasarea unei linii prin punctele obţinute.* În cazul în care nu toate punctele se situează pe linie, atunci linia se trasează printre acestea.

Diagramele pot *fi liniare*, cînd divizarea axelor de coordonate este proporţională cu valorile variabilelor reprezentate (fig. 1) sau *logaritmice*, cînd divizarea axelor este proporţională cu logaritmii variabilelor.

La diagramele logaritmice, axele de coordonate se pot diviza cu rigla de calcul sau cu ajutorul graficului din figura 2; dacă numai una dintre axe este divizată logaritmic graficul reprezintă o diagramă *semilogaritmică*.

În figura 3 s-au reprezentat valorile din tabela 1 într-o diagramă logaritmică, obţinîndu-se o linie dreaptă. Faptul că în diagramele logaritmice relaţiile dintre două variabile sînt reprezentate printr-o linie dreaptă constituie un avantaj important al acestora faţă de diagramele liniare. Această proprietate a diagramelor logaritmice permite corelarea rezultatelor experimentale şi determinarea coeficienţilor formulelor empirice. Se va exemplifica aceasta utilizîndu-se rezultatele experimentale din tabela 1. După cum se

Scanned with OKEN Scanner

va vedea în capitolul III, pierderea de presiune la curgerea unui fluid (gaz sau lichid) prin conducte sau peste diferite obstacole (rezistențe) hidraulice poate fi reprezentată printr-o funcție de forma:

$$\Delta p = a \cdot w^b \tag{1}$$

Logaritmîndu-se această funcție se obține:

$$\log \Delta p = \log a + b \log w \tag{2}$$

Dacă se notează:

$$\log \Delta p = Y;\ \log a = A;\ b = B;\ \log w = X$$

se obține ecuația:

$$Y = A + B \cdot X, \tag{3}$$

care într-o diagramă logaritmică se reprezintă printr-o linie dreaptă. Întradevăr, reprezentînd valorile din tabela 1 în diagrama logaritmică din figura 3, s-a obținut o linie dreaptă avînd ordonata la origine $a = 0{,}112$.

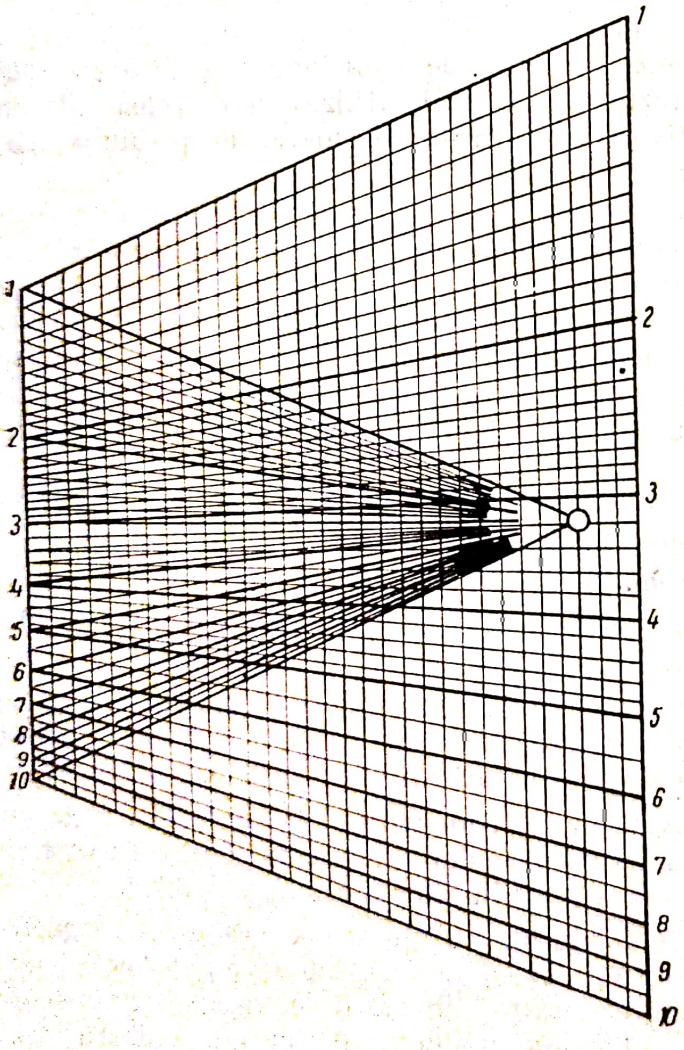


Fig. 2. Grafic pentru divizarea scărilor logaritmice.

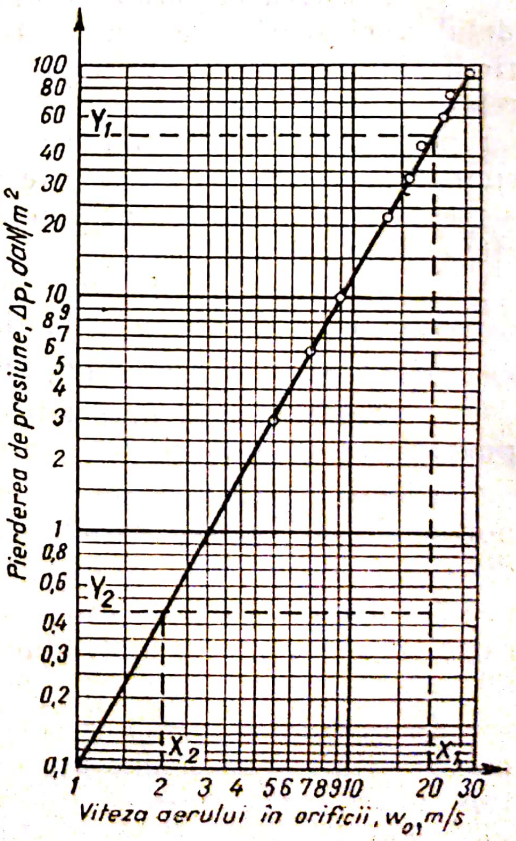


Fig. 3. Reprezentarea grafică a datelor din tabela 1 într-o diagramă logaritmică.

Scanned with OKEN Scanner

Coeficientul b reprezintă panta dreptei și se calculează cu relația:

$$b=B=\frac{Y_2-Y_1}{X_2-X_1}=\frac{\log 50-\log 0{,}45}{\log 20-\log 2}=$$
$$=\frac{1{,}6989-(-0{,}3468)}{1{,}303-0{,}303}=2{,}0457 \qquad (4)$$

Înlocuind în ecuația (1), rezultă următoarea ecuație:

$$\Delta p=0{,}112\,W_0^{2{,}045}.$$

După cum se va vedea la curgerea fluidelor, exponentul vitezei în relația (1) are valoarea 2, adică rezultatul determinat pe cale grafică este foarte apropiat de valoarea reală.

Construirea și folosirea nomogramelor. Nomogramele permit o reprezentare continuă a funcțiilor de mai multe variabile, dînd posibilitatea determinării uneia dintre ele cînd se cunosc valorile numerice ale celorlalte variabile de care depinde.

Nomograma cu scări funcționale paralele. Elementul de bază al nomogramelor îl reprezintă scara funcțională. Scara funcțională provine dintr-o scară dublă (fig. 4), care este un mijloc grafic de reprezentare a relației dintre două mărimi. De exemplu, sînt cunoscute scările duble pentru transformarea gradelor de temperatură Celsius în grade Fehrenheit și a lungimilor din centimetri în țoli, sau invers. Pe scara funcțională apar numai valorile variabilei independente într-un interval și cu o divizare corespunzătoare valorilor luate de variabila dependentă în intervalul considerat. Diviziunile variabilei dependente, proporționale cu distanța de la origine și avînd modulul cunoscut se exclud ca subînțelese.

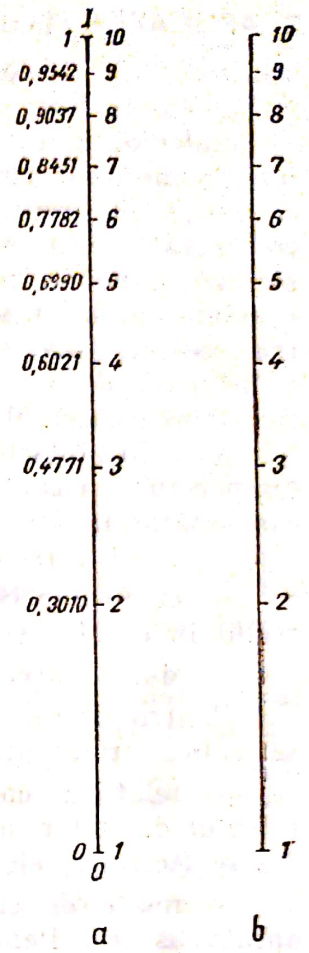


Fig. 4. Construcția scării duble și a scării funcționale.

Exemplu

Să se construiască o scară funcțională pentru funcția $y=\log x$ în intervalul 1—10. Se va construi mai întîi scara dublă corespunzătoare.

Rezolvare

Se ia o dreaptă OI cu o lungime de 100 mm. Se dau variabilei independente x diverse valori în intervalul ales și se calculează valorile corespunzătoare pentru variabila dependentă y. Valorile găsite se reprezintă în partea stîngă a dreptei OI, prin diviziuni proporționale cu distanța de la origine. În partea dreaptă se reprezintă valorile respective ale variabilei independente conform figurii 4, *a*. Se obține astfel o scară dublă. Modulul scării va fi în acest caz $m=\frac{100}{1-0}$. Numărătorul, reprezintă lungimea scării în milimetri, iar 1 și 0 valorile funcției pentru valorile variabilei dependente corespunzătoare limitelor intervalului considerat. Prin ștergerea diviziunilor variabilei dependente y de pe scara dublă se obține scara funcțională din figura 4, *b*.

Nomograme cu scări funcționale paralele se construiesc pentru relațiile de formă generală $f_1(z)=f_2(x)+f_3(y)$ sau pentru funcții care pot fi aduse la această formă.

Nomogramele cu scări funcționale se construiesc și pentru sumele de trei, patru sau cinci funcții, modul de lucru rămînînd același.

Scanned with OKEN Scanner

3. APLICAREA LEGILOR DE BAZĂ ALE FIZICII ȘI MECANICII LA STUDIUL ȘI REALIZAREA OPERAȚIILOR UNITARE

Calculul și conducerea operațiilor, exploatarea și întreținerea utilajelor din industria chimică au întotdeauna la bază fenomenele fizice și chimice *specific* fiecărei tehnologii în parte, *și comune*, mai ales cele fizice, mai multor operații din fabricații diferite. În același timp, unele dintre legile de bază ale fizicii, prin caracterul lor general de valabilitate și aplicabilitate, sînt utilizate curent în studiul operațiilor și al utilajelor industriei chimice. Pentru exemplificare, se prezintă un uscător (fig. 5), care servește la uscarea policlorurii de vinil.

Pentru calculul și conducerea operației de uscare, trebuie să se cunoască:

— debitul (sau cantitatea) de aer necesar pentru uscare, precum și temperatura și conținutul său de umiditate în calorifer și în diferite puncte ale uscătorului;

— debitul (sau cantitatea) și umiditatea materialului supus uscării;

— căldura necesară încălzirii aerului din calorifer și încălzirii materialului în uscător și căldura pierdută în exterior;

— durata uscării.

Pentru obținerea valorilor numerice ale acestor date, este necesar să se aplice următoarele relații de calcul:

— relații de conservare (legea de conservare a masei și energiei) pentru calculul debitelor, a cantităților de materiale și pentru calculul energiei necesare (termică, electrică, mecanică);

— relații de cinetică pentru calculul duratei operațiilor, de exemplu, durata uscării. Pentru calcule practice este necesar să se cunoască viteza de desfășurare în diferite faze sau etape ale operației considerate, adică dinamica operației respective;

— relații de echilibru termodinamic. Condițiile de echilibru caracterizează statica operației respective și indică limitele între care acestea pot decurge.

La aceste relații se adaugă întotdeauna aspectele economice, care au o importanță deosebită, atît în aplicarea unei operații cît, mai ales, în realizarea cu utilaje de maximă eficiență, la un preț de cost cît mai redus.

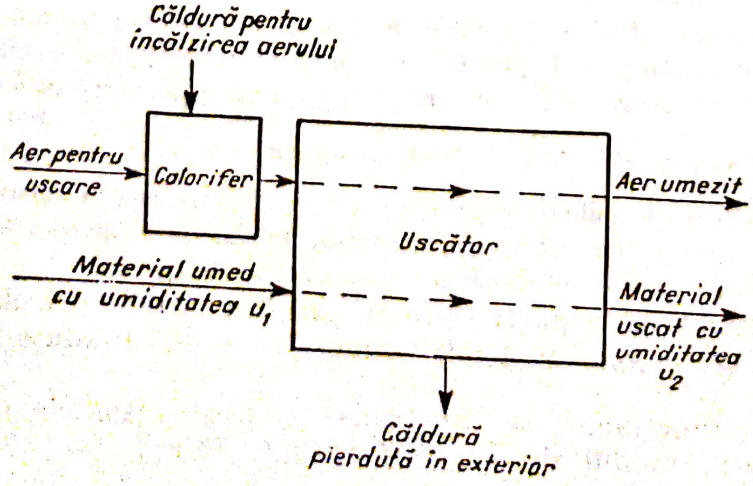


Fig. 5. Schema de funcționare a unui uscător.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicarea relaţiilor de conservare în studiul operaţiilor şi proceselor serveşte pentru stabilirea ecuaţiilor bilanţului de materiale şi ale bilanţului termic. În stabilirea ecuaţiilor de bilanţ este necesar să se ştie dacă operaţiile, procesele sau instalaţiile în care acestea se realizează decurg sau funcţionează continuu sau discontinuu; de asemenea, este necesar să se cunoască regimul de funcţionare a utilajelor sau instalaţiilor respective.

Operaţii şi procese continue. O operaţie sau un proces este continuu atunci cînd toate materialele sînt introduse în mod continuu în instalaţie, iar produsele rezultate sînt evacuate, de asemenea, în mod continuu. Caracteristica principală a operaţiilor continue o constituie debitul materialelor care iau parte la procesul respectiv.

Operaţii şi procese discontinue. Operaţia sau procesul este discontinuu cînd materialele necesare sînt introduse în instalaţie la început (şarja de materiale) şi sînt evacuate după desăvîrşirea operaţiei. Caracteristicile principale ale operaţiilor sau proceselor discontinue sînt: mărimea încărcăturii (şarja) de material şi durata prelucrării.

Se întîlnesc şi operaţii mixte (semicontinue), în care există cel puţin un material introdus sau evacuat continuu şi cel puţin un material introdus sau evacuat discontinuu.

Regimuri de funcţionare. Regimul de funcţionare al unui utilaj sau al unei instalaţii se referă atît la modul de alimentare cu materii prime, cu utilităţi (energie, abur, apă) şi de evacuare a produselor rezultate, cît şi la variaţia în timp şi spaţiu a parametrilor de stare ai acestora: presiune, temperatură, concentraţie etc.

Cînd într-un aparat sau într-o instalaţie nu au loc acumulări de materiale sau de energie, se spune că acestea funcţionează în *regim staţionar sau permanent.* Regimul staţionar de funcţionare implică atît continuitatea operaţiei sau a procesului respectiv, cît şi constanţa locală (în fiecare punct) a parametrilor de stare. Aparatele şi instalaţiile în care au loc acumulări de materiale şi de energie funcţionează în *regim nestaţionar.* Dezvoltarea unui proces de la un regim la altul are loc într-un regim tranzitoriu de funcţionare.

a. Bilanţul de materiale

Ecuaţia generală a bilanţului de materiale reprezintă o particularizare a legii de conservare a materiei şi are forma următoare:

$$\text{Materiale intrate} + \text{Materiale existente} = \text{Materiale ieşite} + \text{Materiale rămase} \qquad (5)$$

În această ecuaţie, cantităţile sau debitele de materiale se exprimă în unităţi de masă; dacă acestea se exprimă în moli, este necesar să se ţină seama de variaţia numărului de moli în cazul în care au loc reacţii chimice.

Diferenţa dintre materialele intrate şi materialele ieşite se numeşte **acumulare.**

$$\text{Materiale intrate} - \text{Materiale ieşite} = \text{Acumulare} \qquad (6)$$

Acumularea de materiale reprezintă variaţia, în raport cu timpul, a cantităţii de materiale din sistem; *dacă operaţia sau procesul decurge în regim staţionar, acumularea este nulă.*

Scanned with OKEN Scanner

Pentru operații și procese continue, bilanțul de materiale se referă la unitatea de timp, de exemplu 1 oră sau o zi (24 ore), iar pentru cele discontinue, se referă la mărimea și durata unei șarje. Pentru întocmirea bilanțului de materiale este necesar, de asemenea, să se delimiteze instalația sau partea din instalație la care se referă, precum și materialele sau componenții care urmează să fie incluși în bilanț. Din acest punct de vedere, **bilanțurile pot fi totale** (*globale, generale*) **sau parțiale.**

Bilanțul de materiale este *total* dacă se referă la întreaga instalație sau dacă include toate materialele care intervin.

Bilanțul de materiale este *parțial* dacă se referă la partea din instalație sau numai la un anumit component; bilanțurile întocmite pentru o parte a instalației se pot referi la toate materialele sau la un singur material.

Pentru operații continue decurgînd în regim staționar, ecuația (6) ia forma:

$$\sum_{i=1}^{i=n_i} m_i = \sum_{e=1}^{e=n_e} m_e, \tag{7}$$

în care:

m_i este debitul de materiale intrate;

m_e — debitul de materiale ieșite.

Relația poate fi scrisă pentru unul sau pentru toate materialele care intervin.

b. Bilanțul energiilor

Bilanțul energiilor reprezintă o aplicație a principiului conservării energiei și se exprimă printr-o ecuație de forma:

Energii intrate + Energii existente = Energii ieșite + Energii rămase	(8)

Dacă se consideră că variația tuturor formelor de energie, în afară de cea calorică, este nulă, atunci bilanțul energiilor se simplifică în forma cunoscută sub numele de bilanț caloric sau termic. În acest caz se iau în considerație numai căldurile intrate și ieșite cu materialele ce participă la operația considerată și căldura introdusă sau evacuată.

Pentru regim staționar, ecuația (8) devine:

$$\sum_{i=1}^{i=n_i} m_i \cdot h_i + Q = \sum_{e=1}^{e=n_e} m_e \cdot h_e \tag{9}$$

sau

$$\sum_{j=1}^{j=n} m_j \cdot h_j + Q = 0 \tag{10}$$

în care:

m_i este masa sau debitul masic al materialelor care iau parte la operația considerată (intrări și ieșiri); materialele ieșite se iau cu semn negativ;

h — entalpia materialelor care intră și ies din instalația considerată;

Q — căldura schimbată de sistem cu exteriorul.

Scanned with OKEN Scanner

În stabilirea bilanțurilor calorice intervine foarte des entalpia materialelor solide, lichide sau gazoase; se lucrează, de asemenea, frecvent cu entalpia vaporilor saturați și supraîncălziți. Se obișnuiește a se nota cu h entalpia raportată la unitatea de masă a solidelor, cu h' entalpia lichidelo la temperatura de fierbere, cu h'' entalpia vaporilor saturați și cu h''' entalpia gazelor sau a vaporilor supraîncălziți; dacă se raportează la un mol de substanță, entalpia se notează cu H.

Calculul entalpiilor. Pentru o substanță care în intervalul de temperatură considerat nu-și schimbă starea de agregare, entalpia la temperatura t se calculează cu ecuația:

$$h=(c_m)_0^t \cdot t, \tag{11}$$

în care: $(c_m)_0^t$ este căldura specifică medie între 0°C și t°C, în J/kg · grd;

Dacă materialul considerat își schimbă starea, la valoarea entalpiei calculată cu relația 11 se adaugă valoarea căldurii latente respective, de topire sau de vaporizare. Astfel, entalpia vaporilor saturați se calculează cu relația:

$$h''=(c'_m)_0^{t_s} \cdot t_s + r, \tag{12}$$

în care:

$(c'_m)_0^{t_s}$ este căldura specifică a lichidului, în J/kg · grd;

t_s — temperatura de saturație (de fierbere a lichidului), în °C;

r — căldura de vaporizare, în J/kg.

Pentru vaporii supraîncălziți, la entalpia vaporilor saturați se adaugă căldura de supraîncălzire q_{sup}, conform relației:

$$h'''=h''+q_{sup} \tag{13}$$

sau

$$h'''=(c'_m)_0^{ts} \cdot t_s + r + (c''_m)_0^{t_{sup}} \cdot (t_{sup}-t_s),$$

în care:

$(c''_m)_0^{t_{sup}}$ este căldura specifică medie a vaporilor supraîncălziți, în J/kg · grd;

t_{sup} — temperatura de supraîncălzire, în °C.

Exemplul 1.

Într-un vas se găsește o cantitate de 50 kg acid sulfuric de concentrație 40 %. Ce cantitate de acid sulfuric de concentrație 90 % trebuie adăugată pentru a se obține în vas o concentrație de 70 %?

Rezolvare

Se aplică ecuația generală (5). În acest caz:

— materiale intrate=x kg H_2SO_4, de concentrație 90 %;

— materiale existente=50 kg H_2SO_4, de concentrație 40 %;

— materiale ieșite=0, totul rămîne în vas;

— materiale rămase=$(x+50)$ kg H_2SO_4, de concentrație 70 %.

Cantitatea de acid sulfuric adăugat în vas se obține dintr-un bilanț parțial de materiale referitoare la componentul acid sulfuric. Ecuația generală va lua deci forma:

$$50 \times 0{,}40 + x \cdot 0{,}90 = (x+50) \cdot 0{,}70$$

din care se obține:

$$x=\frac{50 \times 0{,}70 - 50 \times 0{,}40}{0{,}90-0{,}70}=\frac{15}{0{,}2}=75 \text{ kg } H_2SO_4 \text{ de } 90\,\%.$$

Scanned with OKEN Scanner

Exemplul 2.

Într-un condensator de suprafață are loc concentrarea vaporilor secundari rezultați dintr-un evaporator, folosindu-se ca lichid de răcire apa de recirculație. Se cere să se determine debitul A al apei de răcire.

Se cunosc următoarele date:

— debitul vaporilor de condensat, $W=1\,000$ kg/h;
— presiunea vaporilor, $p=0{,}1$ at;
— temperatura apei de răcire, $t_r=25°C$;
— temperatura condensatului și a apei de răcire la ieșirea din condensator. $t_c=35°C$.

Rezolvare

Se aplică ecuația generală (9) a bilanțului caloric, în care:

Călduri intrate:

— cu aburul secundar ($Q_a=W\cdot h''$);
— cu apa de răcire ($Q_r=A\cdot h'_r$).

Călduri ieșite cu condensatul și cu apa de răcire [$Q_c=(W+A)\cdot h'_c$].

Căldura absorbită (sau pierdută) de sistem din exterior se neglijează.

Înlocuindu-se în ecuația generală (9) rezultă pentru debitul apei de răcire relația:

$$A=W\frac{h''-h'_c}{h'_c-h'_r}.$$

Pentru vapori saturați la presiunea $p=0{,}1$ at, entalpia se obține din tabele:

$$h''=2{,}581\times10^6 \text{ J/kg}.$$

Valorile entalpiilor h'_r și h'_c se calculează cu ajutorul formulei (12), luîndu-se din tabele valoarea căldurii specifice medii $c_m=4{,}19\cdot10^3$ J/kg · grd. Înlocuind în formula (12), rezultă:

$$h'_r=4{,}19\times10^3\times25=1{,}04\times10^5 \text{ J/kg},$$

$$h'_c=4{,}19\times10^3\times35=1{,}47\times10^5 \text{ J/kg}.$$

Înlocuindu-se în relația debitului, se obține pentru debitul apei de răcire valoarea:

$$A=1\,000\,\frac{25{,}81\times10^5-1{,}47\times10^5}{1{,}47\times10^5-1{,}04\times10^5}=1\,000\,\frac{23{,}34}{0{,}43}=54\,000 \text{ kg/h}.$$

4. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND EXPLOATAREA, ÎNTREȚINEREA ȘI REPARAREA UTILAJULUI CHIMIC

a. Cauzele scoaterii din funcțiune a utilajelor

Scoaterea din funcțiune a aparatelor și a mașinilor are loc ca urmare a acțiunii unor factori exteriori (temperatură, presiune, forțe mecanice constante sau variabile în timp, medii corosive, medii abrazive etc.) sau interni (fisuri, tensiuni interne rezultate din sudare, turnare, presare, asamblare etc.). Scoaterea din funcțiune a unui utilaj poate fi provocată de:

— degradarea sa treptată în procesul de exploatare, ca urmare a procesului de uzare și corodare;

Scanned with OKEN Scanner

— degradarea accidentală, bruscă, datorită exploatării şi întreţinerii necorespunzătoare (de exemplu, datorită creşterii accidentale a presiunii sau a temperaturii peste valorile admisibile, neungerii suprafeţelor aflate în mişcare relativă etc.), datorită unor defecte ale materialului de construcţie a utilajului etc.

Pentru a se evita degradarea accidentală, este necesară respectarea tuturor indicaţiilor de funcţionare înscrise în cartea utilajului. De exemplu, dacă un aparat urmează să funcţioneze la temperatură înaltă (400—500°C), la punerea sa în funcţiune trebuie să se asigure încălzirea treptată, pentru a se evita apariţia tensiunilor termice care pot determina fisurarea peretelui aparatului; la întreruperea funcţionării, în vederea opririi utilajului, trebuie să se asigure, de asemenea, răcirea înceată.

Exploatarea raţională a utilajelor chimice, respectiv menţinerea parametrilor de regim la valorile nominale, întreţinerea corectă şi repararea la timp prezintă o importanţă deosebită pentru calitatea produselor şi productivitatea instalaţiilor chimice.

Numeroase utilaje din industria chimică lucrează în condiţii grele, fiind supuse la uzură şi la coroziune. Deşi procesele de uzură şi de coroziune nu pot fi evitate, totuşi durata de utilizare a utilajelor poate fi prelungită printr-o exploatare şi o întreţinere raţională a acestora.

b. Uzarea aparatelor şi a maşinilor din industria chimică

Uzura apare ca urmare a frecării suprafeţelor în contact.

Prin alunecarea unui corp 1, în raport cu alt corp *2*, cu viteza relativă v (fig. 6) apare o forţă F_f datorită căreia corpul *2* se opune mişcării corpului *1*. Forţa F_f se numeşte forţă de frecare şi este proporţională cu forţa normală N care apasă corpul *1* pe corpul *2*, conform relaţiei:

$$F_f = f \cdot N, \tag{14}$$

în care f este coeficientul de frecare.

Coeficientul de frecare depinde de calitatea prelucrării suprafeţelor (rugozitatea), de natura materialelor celor două suprafeţe, de prezenţa lubrifianţilor sau a unor particule abrazive între cele două suprafeţe, de temperatură, precum şi de felul mişcării. Într-un caz dat, uzura depinde de valoarea forţei de frecare, de prezenţa sau absenţa lubrifiantului, de natura celor două suprafeţe în contact etc.

Forţa de frecare, care se opune mişcării relative a suprafeţelor în contact, depinde de felul mişcării: de alunecare sau de rostogolire. Ca o consecinţă se disting: frecarea de alunecare (de exemplu, între fus şi cuzinet sau între segmentul pistonului şi cămaşa cilindrului etc.) şi frecarea de rostogolire (de exemplu, între bilele de rulment şi calea de rulare).

Coeficientul de frecare poate fi atenuat prin ungerea cu lubrifianţi a suprafeţelor de contact. În funcţie de gradul de separare al suprafeţelor pe care-l realizează lubrifiantul, frecarea poate fi uscată, semilichidă sau lichidă. Cu cît regimul de frecare este mai apropiat de frecarea lichidă, cu atît energia consumată prin frecare şi uzura sînt mai mici.

Scanned with OKEN Scanner

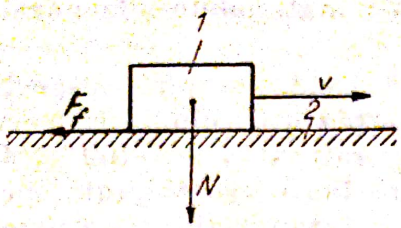


Fig. 6. Frecarea uscată la alunecarea unui corp pe o suprafață.

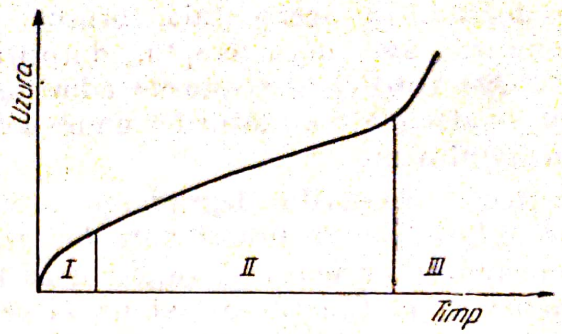


Fig. 7. Variația uzurii în timp.

Deoarece atît consumul de energie cît și uzura pieselor au profunde implicații economice, este necesară micșorarea la maximum a forțelor de frecare. Aceasta se poate realiza prin asigurarea frecării lichide.

Uzura pieselor și a organelor de mașini se manifestă prin modificarea dimensiunilor inițiale și a calității suprafețelor în contact. Uzura variază cu timpul. Pe curba de variație a uzurii cu timpul (fig. 7) se disting trei zone caracteristice (grade de uzură) care corespund următoarelor trei perioade: I — uzură inițială sau de rodaj; II — uzură normală; III — uzură accentuată.

Uzura de rodaj reprezintă o perioadă de netezire a suprafețelor (prin aplatisarea asperităților) și de ajustare bună a pieselor. Această perioadă, prin care trec piesele și organele tuturor mașinilor se produce repede și este o perioadă necesară.

Uzura normală se petrece în cursul exploatării corecte a mașinii și se caracterizează prin creșterea înceată, în timp, a uzurii. Suprafețele care au fost în contact în perioada uzurii normale au aspectul unei suprafinisări sau prezintă mici rugozități.

Uzura accentuată corespunde modificării dimensiunilor pieselor peste limitele admise, cînd au loc: creșterea jocurilor la îmbinări, schimbarea formei geometrice a pieselor etc. În această etapă de uzură, piesa nu mai corespunde scopului funcțional și trebuie înlocuită. Vibrațiile pieselor în mișcare relativă, precum și șocurile accentuează fenomenul de uzură.

La baza fenomenului de uzură stă frecarea. Măsura principală pentru reducerea frecării, și deci a uzurii, constă în micșorarea coeficientului de frecare, prin asigurarea ungerii suprafețelor aflate în mișcare relativă.

După aspectul suprafețelor, ca urmare a uzurii, există patru tipuri fundamentale de uzură care pot apărea la frecarea uscată și în prezența lubrifianților și anume: de aderență, de abraziune, de oboseală și uzura însoțită de coroziune.

Uzura de aderență are aspectul unei suprafinisări, iar uneori al unei rugozități oarecare a suprafețelor. O consecință a uzurii de aderență este griparea, care apare la sarcini mari și în lipsa lubrifiantului. Gripările sînt periculoase deoarece ele pot scoate din funcțiune o mașină înainte ca ea să se fi amortizat.

Uzura de abraziune este provocată de prezența particulelor dure între suprafețele de contact sau de asperitățile mai dure ale uneia dintre suprafețele de contact. Ea accelerează coroziunea.

Scanned with OKEN Scanner

Uzura prin oboseală se datorește solicitării pieselor la forțe variabile în timp. Acest gen de uzură se caracterizează prin apariția pe suprafața pieselor fie a unor mici scobituri de forme diverse, răspîndite pe întreaga suprafață (uzură prin ciupituri sau pitting), fie a unei fărîmițări și îndepărtări (exfoliere) sub formă de solzi a materialului suprafețelor pieselor. Ciupiturile apar la căile de rulare ale rulmenților, pe flancurile dinților roților dințate, la cuplajele cu gheare etc. Exfolierea apare, de exemplu, ca tip de uzură a căii de rulare a inelelor de rulment.

Uzura însoțită de coroziune este rezultatul reacției chimice dintre suprafețele pieselor și agenții corosivi, reacție care produce schimbarea proprietăților stratului superficial al materialului pieselor. Uzura prin oxidare reprezintă un caz particular de uzură prin coroziune. Oxigenul contribuie la mărirea vitezei de uzură prin oxidarea suprafețelor și prin degradarea lubrifianților și aditivilor.

c. Corodarea utilajului chimic

Corodarea poate determina, uneori, scoaterea din funcțiune a utilajelor. În industria chimică, de cele mai multe ori, mediul în care sînt amplasate utilajele este corosiv. Coroziunea poate fi uniformă sau locală.

Coroziunea uniformă a metalelor se produce prin micșorarea uniformă și pe toată suprafața a grosimii pieselor. Aprecierea rezistenței la coroziune se face cu ajutorul indicatorului viteză de coroziune, v_c, care arată viteza de micșorare a grosimii materialului, în mm/an.

Pierderea de grosime datorită coroziunii $(\Delta_s)_{cor}$, pe durata de serviciu a (măsurată în ani), pe o față a materialului, este:

$$(\Delta_s)_{cor} = v_c \cdot a \qquad (15)$$

Viteza de coroziune depinde de rezistența la coroziune a materialului respectiv.

Coroziunea locală se produce prin micșorarea grosimii metalului, local, ca urmare a acțiunii selective a mediului corosiv față de constituenții materialului utilajului.

d. Repararea utilajului chimic

Prin aplicarea sistemului preventiv de reparații periodice planificate se asigură: menținerea utilajelor în permanentă stare de funcționare, la parametrii nominali; prelungirea perioadei de funcționare a utilajelor între reparații; reducerea cheltuielilor de reparații. Timpul de funcționare dintre două reparații se stabilește pentru fiecare tip de utilaj în raport cu caracteristicile sale și cu condițiile de funcționare.

Un utilaj intră în reparație cînd a atins o limită de uzură neadmisibilă.

Reparațiile planificate pot fi curente (RC) și capitale (RK).

Reparațiile curente pot fi de gradul I (RC_1) sau de gradul II (RC_2), după volumul și complexitatea lucrărilor executate.

Scanned with OKEN Scanner

Reparaţiile capitale constau în demontarea completă în piese componente a aparatului sau a maşinii, urmată de înlocuirea tuturor subansamblurilor şi a pieselor uzate sau de recondiţionarea pieselor care necesită o prelucrare tehnologică mai complicată.

Prin reparaţia capitală se urmăreşte readucerea utilajului cît mai aproape de parametrii funcţionali şi de randamentul corespunzător stării tehnice iniţiale.

La executarea reparaţiilor capitale, utilajele sînt scoase din funcţiune pe tot timpul reparaţiei.

Distrugerile accidentale ale unor piese componente ale aparatelor sau ale maşinilor, determină oprirea utilajului şi repararea lui. Această reparaţie fiind neplanificată (accidentală) afectează atît planul de reparaţii cît şi planul de producţie al întreprinderii. Reparaţiile accidentale sînt urmarea: exploatării incorecte, reparaţiei planificate necorespunzătoare sau utilizării unor materiale necorespunzătoare pentru piesele înlocuite cu ocazia reparaţiei planificate, nerespectării normelor de tehnica securităţii muncii, incendii etc.

Intervalul de timp dintre două reparaţii capitale sau de la intrarea utilajului în serviciu şi pînă la prima reparaţie capitală poartă numele de *ciclu de reparaţii*. Într-un ciclu de reparaţii, utilajele sînt supuse la mai multe revizii tehnice, reparaţii curente şi o reparaţie capitală.

Durata de funcţionare efectivă între două reparaţii capitale succesive prezintă importanţă în planificarea reparaţiilor şi în realizarea planului de producţie al întreprinderii.

Durata de imobilizare a utilajului pentru reparaţie reprezintă timpul cît utilajul este scos din funcţiune în vederea executării lucrărilor de reparaţii. Aceasta trebuie să fie cît mai mică, pentru a nu influenţa negativ producţia.

Planul de reparaţii trebuie corelat cu planul de producţie al întreprinderii.

Demontarea utilajelor în vederea reparării. Utilajele trebuie să se demonteze cu atenţie, pentru a se evita deteriorarea lor suplimentară. În acest scop se utilizează dispozitive şi scule speciale, cum sînt: dispozitivele pentru demontarea şi montarea rulmenţilor, dispozitivele pentru demontarea prezoanelor, dispozitivele pentru demontarea lagărelor de alunecare şi a bucşelor montate prin presare, sculele pentru scoaterea şuruburilor rupte din piesă etc.

La demontarea rulmenţilor trebuie avut grijă să nu se deterioreze alezajul sau rulmentul. Lipsa dispozitivelor pentru extragerea rulmenţilor nu duce la ieftinirea reparaţiilor, ci la cheltuieli inutile pentru repararea deteriorărilor sau înlocuirea rulmenţilor deterioraţi la demontare. Scoaterea rulmenţilor prin aplicarea loviturilor de ciocan nu este permisă decît uneori, la rulmenţii cu alezaj conic. Rulmenţii montaţi cu strîngere se demontează după ce în prealabil au fost încălziţi cu ulei mineral la 90—100°C. Încălzirea se face prin turnarea uleiului fierbinte pe rulment, în timp ce arborele se protejează cu azbest sau cu carton.

Roţile dinţate montate prin strîngere se demontează cu ajutorul unor dispozitive şi extractoare de aceeaşi construcţie cu a acelora folosite la demontarea rulmenţilor. Dacă depresarea se face greu, roata dinţată se încălzeşte pînă la 100—200°C, repede, pentru a nu se încălzi şi arborele.

După demontare, pe baza analizei gradului de uzură al pieselor, acestea se sortează în trei grupe: piese bune, piese de reparat şi piese de înlocuit.

Scanned with OKEN Scanner

Piesele al căror grad de uzură nu este prea înaintat și este economic să fie recondiționate intră în grupa pieselor de reparat. Piesele care au ajuns la limita de uzură și nu mai este posibilă recondiționarea lor, se înlocuiesc.

Recondiționarea pieselor uzate se poate face, după caz, prin următoarele procedee: turnare, prelucrare mecanică (la dimensiunile de reparație), încărcare prin sudare, depuneri de straturi (prin electroliză, metalizare), prelucrare prin deformare plastică etc.

Funcționarea mașinilor și a aparatelor după reparație depinde de corectitudinea cu care au fost efectuate operațiile de demontare, reparare și remontare a pieselor și a subansamblurilor componente ale acestora. După montare se efectuează probarea funcționării corecte și liniștite a mașinii reparate. La utilajele statice, după reparare se fac probele de etanșeitate și de presiune.

Metodologia reparării. Ca metode de reparare se disting: repararea individuală și repararea pe subansambluri: ultima metodă se aplică în cazul reparării simultane a mai multor utilaje de același fel.

În scopul reparării, utilajul se demontează întîi pe subansambluri, apoi fiecare subansamblu se demontează în piese componente. După spălare și curățare, piesele sînt grupate în: piese bune, piese cu defecte reparabile și piese uzate (inutilizabile).

Pentru micșorarea duratei reparației individuale se vor pregăti din timp piesele de schimb necesare.

La repararea pe subansambluri este necesar să se prevadă, ca rezervă de schimb, diferite subansambluri (pompe, organe de închidere etc.).

După punerea în funcțiune a utilajului reparat, piesele sau subansamblurile care au fost înlocuite și care au defecte reparabile se recondiționează pentru a constitui rezerva următoarei revizii sau reparații.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul II

NOȚIUNI DE REZISTENȚA MATERIALELOR ȘI ORGANE DE MAȘINI

1. NOȚIUNI DE REZISTENȚA MATERIALELOR

Rezistența materialelor este știința care introduce în calcule proprietatea corpurilor de a se deforma pentru a stabili dacă un corp rezistă sau nu la sarcinile exterioare (forțe, momente) care îi sînt aplicate.

De exemplu, pentru bara AB rezemată pe două reazeme A și B (fig.8) și solicitată cu forța F, rezistența materialelor permite calculul deformației în fiecare punct al barei. În consecință, se poate calcula valoarea forței F care determină ruperea barei (ca urmare a atingerii deformației corespunzătoare ruperii).

Pentru a determina dacă corpurile rezistă sau nu sarcinilor aplicate, rezistența materialelor (spre deosebire de mecanică) consideră corpurile deformabile sau nerigide și utilizează în calcule proprietatea corpurilor reale de a se *deforma*.

Obiectul rezistenței materialelor constă în:

— *dimensionarea* pieselor de mașini sau a construcțiilor cu condiția ca ele să reziste sarcinilor aplicate;

— *verificarea* dacă o piesă sau o construcție de dimensiuni date rezistă sau nu sarcinilor la care sînt supuse.

Pentru a efectua aceste calcule (de dimensionare sau de verificare) este necesară cunoașterea unor *proprietăți mecanice ale materialelor* din care se execută piesele sau construcțiile.

La dimensionarea pieselor se urmărește ca acestea să reziste solicitărilor și să asigure buna funcționare a mașinii sau a ansamblurilor în care sînt montate.

Totodată dimensiunile și forma piesei trebuie astfel stabilite încît să determine un preț de cost minim.

Forțele care solicită o piesă, în cadrul rezistenței materialelor (spre deosebire de mecanică), sînt vectori legați. De exemplu, un corp real oarecare,

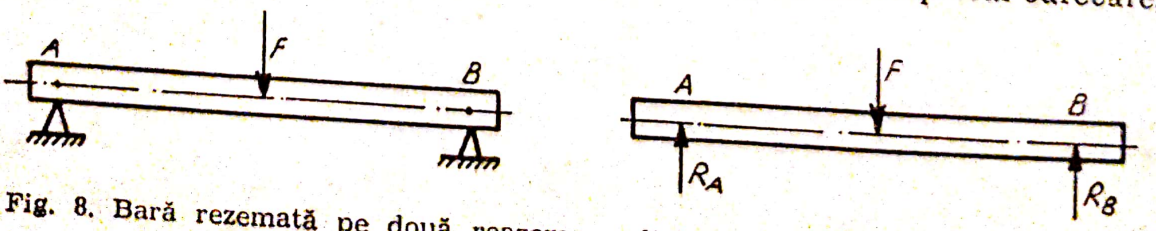


Fig. 8. Bară rezemată pe două reazeme, solicitată cu forța concentrată F.

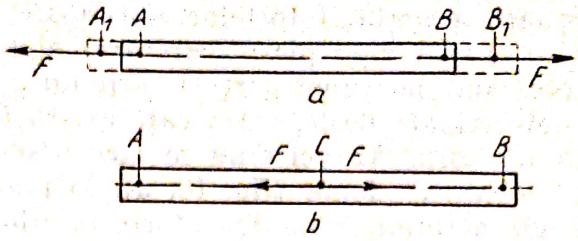


Fig. 9. Bară supusă la întindere:
a — forțele sînt aplicate în punctele *A* și *B*;
b — forțele aplicate în punctul C.

este supus acțiunii forțelor F egale și de sens contrar, aplicate pe aceeași direcție, în punctele A și B (fig. 9 *a*). Sub efectul forțelor F, corpul se deformează, punctele A și B se îndepărtează între ele și ajung în A_1 și respectiv B_1.

Dacă forțele *nu* ar fi considerate vectori legați (ca în mecanica corpului rigid), ele ar putea fi deplasate pe suportul lor comun pînă în punctul C (fig. 9, *b*). Aici ele se echilibrează, rezultanta fiind nulă; este ca și cum corpul nu ar fi solicitat. Deformarea corpului nu se mai produce, fenomenul fizic real fiind deci, complet altul dacă se admite alunecarea vectorilor pe suportul lor. În consecință, la analiza rezistenței materialelor reale, deformabile, forțele trebuie considerate cu puncte de aplicație bine definite (forțele sînt vectori legați).

a. Tipuri de solicitări

O piesă de mașină sau o construcție este, în general, supusă acțiunii unor forțe sau unor momente (cupluri). Aceste forțe și momente aplicate piesei din exterior, pe anumite porțiuni sau în anumite puncte ale ei ca și forțele distribuite în întreaga masă a materialului (greutate) forța de inerție etc. se numesc sarcini sau *forțe exterioare*, de exemplu, forța F din figura 8, forțele F din figura 9 și forța determinată de greutatea barei AB.

Forțele care arată efectul reazemului asupra corpului, se numesc *reacțiuni* sau *forțe de legătură*, de exemplu, reacțiunile R_A și R_B din reazemele A și B din figura 8, *b*.

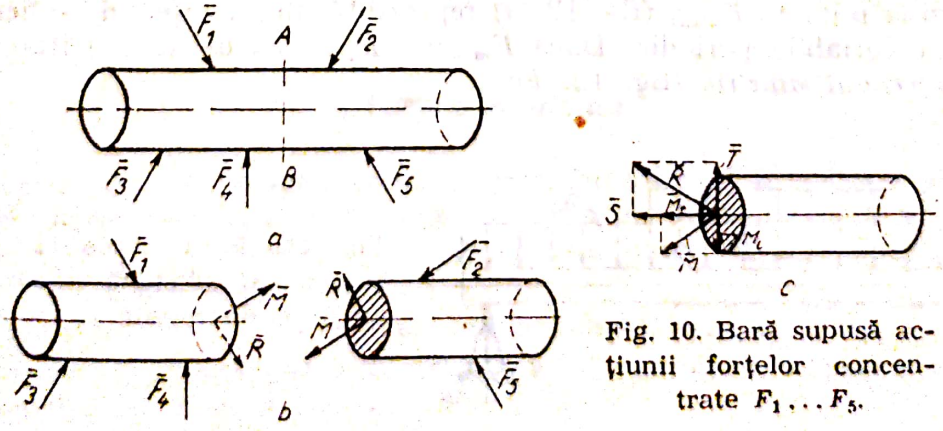


Fig. 10. Bară supusă acțiunii forțelor concentrate $F_1 \ldots F_5$.

Ca urmare a acțiunii forțelor exterioare și de legătură, în interiorul corpului (bară, arbore, o piesă oarecare) apar *forțe interioare* sau eforturi. Acestea arată acțiunea unei părți a corpului asupra celeilalte. Forțele interioare sînt determinate de legătura care există între particulele adiacente din interiorul unui corp. Atunci cînd se face o secțiune virtuală printr-un corp solicitat de forțe exterioare (fig. 10, *a*), în planul secțiunii AB se introduce rezultatul interacțiunii celor două forțe interioare (fig. 10, *b*). Ele sînt forțe $\overline{R}$, și momente $\overline{M}$, și sînt egale și de sensuri contrare. Prin introducerea forțelor interioare fiecare dintre părțile separate se va afla în echilibru. Dacă se reface continuitatea corpului prin anularea secționării, forțele interioare $\overline{R}$ și $\overline{M}$ se anulează reciproc, iar corpul va rămîne în echilibru sub acțiunea forțelor $\overline{F}_1 \ldots \overline{F}_5$. Forțele interioare se aplică în centrul de greutate al secțiunii.

1) Forțele exterioare

Forțele exterioare pot fi clasificate astfel:

După modul de acțiune se disting:

— forțe exterioare *aplicate pe suprafața corpului*: de exemplu, forțele $\overline{F}_1$, $\overline{F}_2 \ldots \overline{F}_5$ (fig. 10, *a*), forțele $\overline{R}_A$, $\overline{R}_B$ și $\overline{F}$ (fig. 8), forțele p_1, p_2, p_3 (fig. 11). Ele sînt forțe concentrate ($\overline{F}_1 \ldots \overline{F}_5$: $\overline{R}_A$, R_B) sau distribuite pe suprafață ($\overline{p}_1$, $\overline{p}_2$, $\overline{p}_3$);

— forțe exterioare *distribuite în tot volumul corpului* sau *forțe masice*; de exemplu greutatea, forțele de inerție, forțele electromagnetice;

După variația în *timp* a forțelor se disting forțe sau sarcini *statice* și *dinamice*.

Sarcinile statice sînt acelea care se aplică lent, progresiv, crescînd de la zero pînă la valoarea ei finală, după care rămîne constantă în timp.

Sarcinile dinamice sînt sarcini care se aplică cu viteză mare, constantă sau variabilă în timp. Astfel, sarcinile *aplicate prin șoc* se caracterizează prin variația bruscă a vitezei. *Sarcinile variabile periodice* oscilează în mod continuu între o valoare maximă și una minimă. O bară în consolă supusă forței F care variază continuu și periodic în timp, între o valoare maximă F_{max} și una minimă F_{min}, (fig. 12, *a*) reprezintă un exemplu de solicitare cu o sarcină variabilă periodic. Dacă $F_{min} = -F_{max}$, ciclul de solicitare se numește *alternant simetric* (fig. 12, *b*):

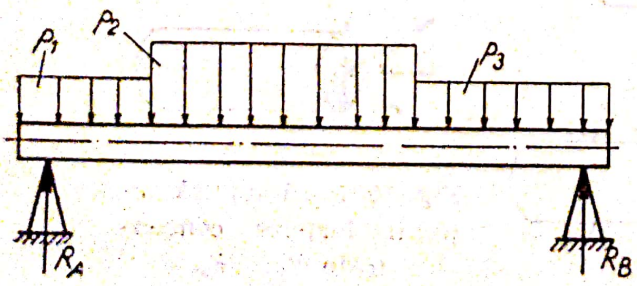


Fig. 11. Bară rezemată pe două reazeme și solicitată cu sarcini uniform distribuite p_1, p_2 și p_3.

Scanned with OKEN Scanner

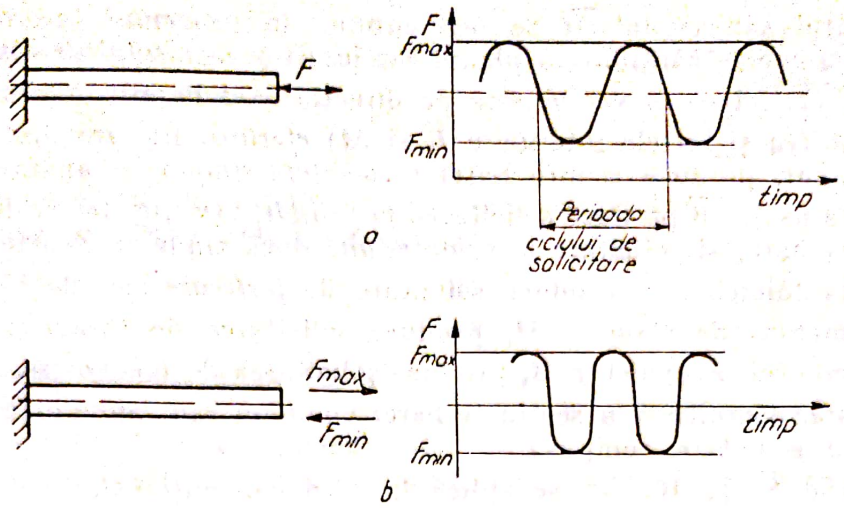


Fig. 12. Bară solicitată cu forțe variabile în timp $[F_{min}, F_{max}]$:
a — ciclu de solicitare variabil periodic; *b* — ciclu de solicitare alternant simetric.

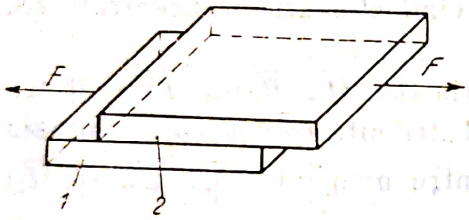


Fig. 13. Ansamblul format prin încleierea plăcilor *1* și *2* solicitat la forfecare.

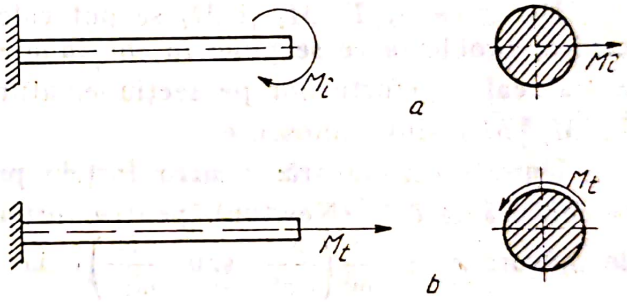


Fig. 14. Bară solicitată cu moment de încovoiere (*a*) și de torsiune (*b*).

După natura și efectul pe care-l produc, sarcinile exterioare pot fi:
— forțe *de întindere* (forța F din figura 12, *a* și F_{max} din figura 12, *b*), *de compresiune* (forța F_{min} din figura 12, *b*), de *forfecare* (fig. 13) și de încovoiere (forța F din figura 1 și p_1, p_2, p_3 din figura 11;)
— momente de încovoiere (fig. 14, *a*) și momente de răsucire (fig. 14, *b*).

2) Forțele interioare

În cazul general, forțele interioare (care sînt vectori) $\overline{R}$ și $\overline{M}$ (v. fig. 10, *b*) au direcții oarecare în spațiu. Ele pot fi descompuse în componente pe direcția normalei la planul secțiunii (pe direcția axei barei) și componente conținute în planul secțiunii (v. fig. 10, *c*).

Rezultanta $\overline{R}$ se descompune într-o componentă normală $\overline{S}$, numită *forță normală* sau axială și o componentă $\overline{T}$, conținută în planul secțiunii și denumită *forță tăietoare*.

Scanned with OKEN Scanner

Momentul sau cuplul $\overline{M}$ se descompune în *momentul încovoietor* $\overline{M}_i$, (a cărui vector este conținut în planul secțiunii) și *momentul de răsucire sau de torsiune*, $\overline{M}_t$ (al cărui vector este pe direcția axei barei); mărimile $\overline{S}$, $\overline{T}$, $\overline{M}_i$, $\overline{M}_t$ sînt (ca și forțele interioare $\overline{R}$ și $\overline{M}$) *eforturi*. Fiecare dintre aceste eforturi, singur, produce asupra barei o *solicitare simplă*, și anume:

— forța axială $\overline{S}$ produce solicitarea la *întindere* (v. fig. 10, *c*) dacă tinde să lungească bara, și solicitare la *compresiune* dacă tinde să scurteze bara;

— forța tăietoare $\overline{T}$ produce solicitare de *forfecare* sau de tăiere;

— momentul de răsucire $\overline{M}_t$ produce solicitarea de răsucire;

— momentul încovoietor $\overline{M}_i$ produce solicitarea de încovoiere.

Solicitarea simultană a secțiunii barei cu două sau mai multe eforturi reprezintă o solicitare compusă.

Eforturile $\overline{S}$, $\overline{T}$, $\overline{M}_i$, $\overline{M}_t$ se aplică în mod convențional, în centrul de greutate al secțiunii. Ele sînt rezultatul interacțiunii celor două părți ale secțiunii. Această interacțiune (prin eforturi distribuite) are loc pe toate elementele de suprafață ale secțiunii. Prin urmare eforturile concentrate (în centrul de greutate) $\overline{S}$, $\overline{T}$, $\overline{M}_i$, $\overline{M}_t$ sînt rezultantele eforturilor distribuite din secțiune.

Deoarece $\overline{S}$, $\overline{T}$, $\overline{M}_i$ și $\overline{M}_t$ se pot calcula pe baza cunoștințelor de mecanică, problema ce se pune în continuare este aceea de a determina distribuția reală a eforturilor pe secțiune, atunci cînd eforturile concentrate ($\overline{S}$, $\overline{T}$, $\overline{M}_i$, $\overline{M}_t$) sînt cunoscute.

Unități de măsură: pentru forțele propriu-zise ($\overline{F}$, $\overline{R}$, $\overline{S}$, $\overline{T}$) unitatea de măsură este N (Newton), pentru forțele distribuite ($\overline{p}_1$, $\overline{p}_2$, $\overline{p}_3$), unitatea de măsură este $\frac{N}{m^2}\left(\frac{N}{cm^2}\right.$ sau $\left.\frac{N}{mm^2}\right)$, iar pentru momente ($\overline{M}$, $\overline{M}_i$, și $\overline{M}_t$) unitatea de măsură este $N \cdot m$.

În locul Newtonului deseori se utilizează multiplii săi:

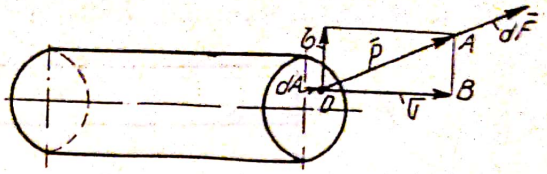
deca Newtonul;	1 daN=10 N
kilo Newtonul;	1 kN=10^3N
Mega Newtonul;	1 MN=10^6N
Giga Newtonul;	1 GN=10^9N

b. Eforturi unitare

Prin *efort unitar* se înțelege forța interioară (sau efortul) aplicată pe unitatea de suprafață din aria secțiunii. Pentru exemplificare se consideră un element de suprafață dA (fig. 15) suficient de mic, astfel ca forța interioară (de interacțiune cu suprafața de care a fost virtual desprinsă) să poată fi considerată uniform distribuită. Rezultanta dF a acestor forțe uniform

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 15. Descompunerea efortului unitar p în componente σ şi τ.



distribuite se aplică în centrul de greutate al elementului dA. *Efortul unitar* are, conform definiţiei anterioare, expresia:

$$p=\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}A} \tag{16}$$

şi are aceeaşi direcţie şi acelaşi sens cu dF (sînt vectori).

Efortul unitar p avînd o direcţie oarecare se descompune (ca şi forţa R, de exemplu) în două componente (fig. 15):

— o componentă pe direcţia normalei la secţiune, notată cu σ şi denumită *efort unitar normal:*

$$\sigma=\frac{S}{A}, \tag{17}$$

— o componentă conţinută în planul secţiunii, notată cu τ şi denumită *efort unitar tangenţial*

$$\tau=\frac{T}{A}, \tag{18}$$

în care A este aria secţiunii.

Efortul unitar σ reprezintă un efort de întindere sau de compresiune (cînd are sens contrar celui din figura 8), iar τ reprezintă un efort de forfecare (tăiere) sau de lunecare.

Între mărimile componentelor eforturilor (fig. 15) există relaţia:

$$p^2=\sigma^2+\tau^2 \tag{19}$$

care rezultă din aplicarea regulii lui Pitagora în triunghiul OAB.

Unitatea de măsură a efortului unitar este $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$. În tehnică se mai utilizează $\frac{\mathrm{daN}}{\mathrm{mm}^2}$; $\frac{\mathrm{daN}}{\mathrm{cm}^2}$ şi $\frac{\mathrm{MN}}{\mathrm{m}^2}$.

Observaţie. Dacă forţele aplicate asupra unui corp rămîn constante, eforturile unitare în schimb variază cu direcţia elementului de arie pe care el acţionează. Din acest motiv operaţiile care se fac cu vectorii (adunare, scădere etc.) nu pot fi aplicate eforturilor unitare decît după ce acestea au fost înmulţite cu ariile respective, adică au fost transformate în forţe.

Aplicaţii.

1. Să se calculeze efortul unitar normal într-o bară circulară cu raza $R=5$ cm, supusă întinderii cu o forţă $F=400\,000$ N (Fig. 16, *a*). Din relaţia 17, în care $S=F$ şi $A=\pi\cdot R^2$ se obţine:

$$\sigma=\frac{S}{A}=\frac{400\,000}{\pi\cdot 25}=5\,330\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{cm}^2}=533\,\frac{\mathrm{daN}}{\mathrm{cm}^2}$$

Se mai poate scrie $\sigma=53{,}3\,\frac{\mathrm{MN}}{\mathrm{m}^2}$.

Scanned with OKEN Scanner

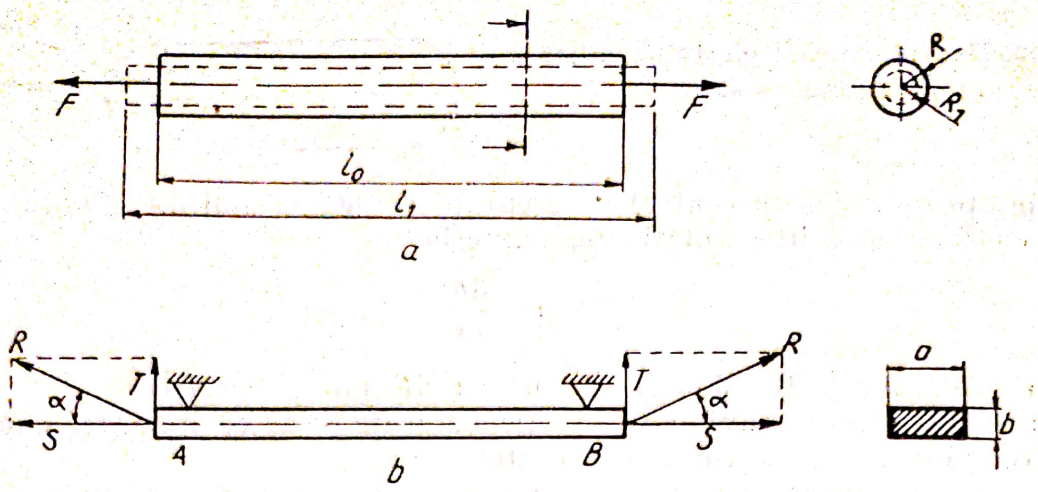


Fig. 16. Bară solicitată la întindere (*a*) și rezemată (în *A* și *B*) solicitată cu forțele *R* (*b*).

2. Să se calculeze eforturile unitare σ și τ la capetele barei cu secțiunea dreptunghiulară din figura 16, *b*, solicitată de forța $R=500\,000$ N. Forța *R* face un unghi $\alpha=30°$ cu axa barei. Secțiunea barei are dimensiunile $a=10$ cm și $b=3$ cm.

Se descompune forța *R* pe direcția axei barei și pe direcția perpendiculară la aceasta. Se obține:

$$S=R\cdot\cos\alpha=500\,000\cdot\cos 30°=5\times10^5\times\frac{\sqrt{3}}{2}=4{,}325\times10^5\text{N}$$

$$T=R\cdot\sin\alpha=500\,000\cdot\sin 30°=5\times10^5\times\frac{1}{2}=2{,}5\times10^5\text{N}.$$

Aria secțiunii transversale a barei $A=a\cdot b=10\cdot 3=30$ cm^2.
Eforturile unitare, rezultă din relațiile 17 și 18:

$$\sigma=\frac{S}{A}=\frac{4{,}325\times10^5}{30}=14\,416{,}6\,\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}=1\,441{,}66\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}=144{,}166\,\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$\tau=\frac{T}{A}=\frac{2{,}5\times10^5}{30}=8\,333{,}3\,\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}=833{,}33\,\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}=83{,}333\,\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}.$$

c. Deformații. Contracția transversală

Sub efectul sarcinilor exterioare sau al unor factori cu efect analog (variații de temperatură), corpurile se deformează. Valoarea deformației depinde de: natura materialului din care este făcut corpul, de dimensiunile corpului și de mărimea forțelor exterioare aplicate. Natura materialului corpului influențează deformațiile prin *proprietățile sale mecanice.*

O bară solicitată la întindere de forțele *F* se deformează și trece de la lungimea inițială l_0 la lungimea de după deformare l_1 (fig. 16, *a*). Diferența

$$\Delta l=l_1-l_0 \qquad (20)$$

Scanned with OKEN Scanner

se numește *alungire*; ea reprezintă alungirea totală a barei și depinde de lungimea inițială a barei:

$$\Delta l = l_0\left(\frac{l_1}{l_0} - 1\right). \tag{21}$$

Caracterizarea deformării barei, independent de dimensiunile acesteia se face cu ajutorul *deformației specifice*

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{22}$$

care reprezintă deformația unității de lungime a barei. O porțiune de lungime 1 devine după deformare $1+\varepsilon$.

În cazul din figura 16, *a* deformația este o alungire, iar deformația specifică o alungire specifică. Dacă forțele F ar fi de compresiune, deformația devine o scurtare, iar deformația specifică o scurtare specifică.

Deformațiile specifice ε sînt adimensionale. Ele sînt produse de componentele normale σ ale eforturilor unitare.

Odată cu alungirea barei are loc micșorarea ariei secțiunii ei transversale. Fenomenul se numește *contracție transversală*. Micșorarea unității de lungime pe direcție transversală ε_t este proporțională cu alungirea specifică:

$$\varepsilon_t = -\mu \cdot \varepsilon, \tag{23}$$

în care μ este *coeficientul de contracție transversală* sau *coeficientul lui Poisson*.

În urma solicitării de întindere a barei circulare din figura 16 *a*, lungimea ei devine $l_1 = l_0(1+\varepsilon)$, iar raza devine $R_1 = R_0(1+\varepsilon_t)$ sau $R_1 = R_0(1-\mu \cdot \varepsilon)$.

Aplicații

1. O bară circulară de rază $R=3$ cm și lungime $l=100$ cm, construită dintr-un material cu coeficient de dilatare termică liniară $\alpha = 1{,}2 \times 10^{-5}\,\text{grd}^{-1}$, este încălzită de la temperatura $T_0 = 20°\text{C}$ pînă la temperatura $T = 220°\text{C}$. Să se calculeze alungirea, alungirea specifică și raza după încălzire.

Lungimea barei după încălzire:

$$l_1 = l_0[1+\alpha(T-T_0)] \tag{24}$$

Alungirea barei, conform relațiilor 20 și 24 rezultă

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \alpha \cdot l_0 \cdot (T-T_0) = 1{,}2 \times 10^{-5} \times 100 \times (220-20) = 2{,}4 \times 10^{-1}\,\text{cm}.$$

Alungirea specifică se obține din relația 22

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot (T-T_0) \tag{25}$$

sau

$$\varepsilon = 1{,}2 \times 10^{-5} \times 200 = 0{,}24 \times 10^{-2} = 0{,}24\%$$

După încălzire, raza crește și devine:

$$R' = R \cdot [1+\alpha(T-T_0)] = 3 \cdot [1+1{,}2 \times 10^{-5} \times 200] = 3{,}0072 \text{ cm}.$$

2. Pentru bara din exemplul precedent, supusă unei forțe de întindere F, se obține o alungire specifică $\varepsilon = 1\%$. Să se calculeze contracția transversală, dacă $\mu = 0{,}3$.

Scanned with OKEN Scanner

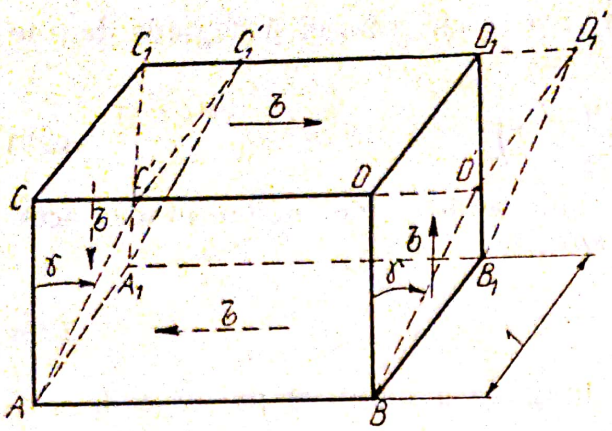


Fig. 17. Paralelipiped elementar solicitat la forfecare.

Deformaţia specifică $\varepsilon = 1\% = 0{,}01$ determină, conform relaţiei (23) contracţia transversală

$$\varepsilon_t = -\mu\varepsilon = -0{,}3 \times 0{,}01 = -3 \times 10^{-3}$$

Raza barei după întindere devine $R_1 = R(1+\varepsilon_t) = 3(1-0{,}003) = 92{,}91$ cm.

Dacă bara ar fi supusă unei forţe de compresiune $F_1 = -F$, atunci scurtarea specifică este $\varepsilon = -0{,}01$, contracţia transversală devine umflare transversală $\varepsilon_t = +3 \times 10^{-3}$, iar $R'_1 = 3(1+0{,}003) = 3{,}009$ cm.

Efortul unitar trngenţial τ produce *lunecări specifice*. Se consideră elementul de volum apaalelipipedic $ABCDA_1B_1C_1D_1$ (fig. 17). Pe cele patru feţe perpendiculare pe planul desenului, de lăţime egală cu unitatea, acţionează eforturile unitare tangenţiale τ, egale între ele şi avînd sensurile din figura 17. Se consideră faţa ABA_1B_1 imobilizată ca urmare a acţiunii lui σ. În acest caz, faţa CDC_1D_1 *lunecă* paralel cu ea însăşi încît paralelipipedul devine $ABA_1B_1C'D'C_1D_1$. Lunecarea se măsoară prin unghiul α dintre feţele ACC_1A_1 şi $AC'C'_1A_1$ care se numeşte *lunecare specifică*. Lunecarea specifică se măsoară în radiani şi este o mărime adimensională.

Lunecările înainte de rupere sînt, în general, relativ mici. Ele dispar odată cu cauza care le-a produs dacă eforturile unitare produse în material sînt inferioare unei anumite limite (a cărei valoare depinde de natura materialului) denumită limită de elasticitate.

În funcţie de mărimea deformaţiei produse înainte de rupere materialul este:

— *tenace*, dacă deformaţiile sale înainte de rupere sînt mari, de exemplu: oţelurile de rezistenţă mică, cuprul, alama, aluminiul etc.;

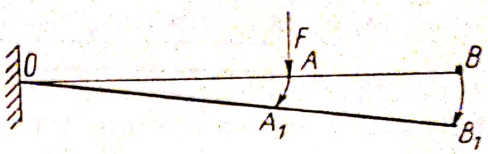
— *fragil* sau *casant* dacă se deformează foarte puţin înainte de a se rupe de exemplu: fonta, oţelurile de mare rezistenţă, sticla, piatra, betonul etc.

d. Deplasări

În cursul procesului de deformare a unui corp, punctele sale îşi schimbă poziţia. Drumul parcurs de un punct al corpului în decursul deformării sale se numeşte *deplasare*.

De exemplu, bara încastrată în O din figura 18, nesolicitată, ocupă poziţia OAB; după încărcarea cu forţa F devine OA_1B_1. Porţiunea OA se deformează încît OA_1 este curbilinie. Porţiunea AB nu se deformează, deoarece dacă deplasarea are loc de la B spre A nu se întîlnesc nici o forţă care ar putea produce deformarea. Porţiunea A_1B_1 este rectilinie. Datorită deformării, punctele barei se deplasează; A în A_1; B în B_1 etc. Deplasarea lui

Fig. 18. Bară solicitată la încovoiere cu forța F.



B în B_1 are loc datorită deformării porțiunii OA sub efectul forței F și ca urmare a continuității barei OA_1B_1 și după deformare.

Punctul O din încastrare *nu* se deplasează.

e. Relații între eforturi unitare și deformații specifice

Mărimile fundamentale, eforturile unitare și deformațiile specifice, sînt dependente între ele. Dependența dintre ele se determină pe cale experimentală cu ajutorul încercărilor pe epruvete. Rezultatul acestor încercări se reprezintă grafic în coordonate $\sigma-\varepsilon$ (fig. 19) sau $\tau-\gamma$. Curbele astfel obținute poartă numele de curbe *caracteristice ale materialului*.

Pe curba caracteristică, de întindere, a oțelului se disting punctele importante A, B, C și D a căror ordonate au următoarele semnificații:

σ_p — limita de proporționalitate: porțiunea OA este liniară.

σ_e — limita de elasticitate: corpul solicitat cu eforturi unitare $\sigma < \sigma_e$, după descărcare revine la lungimea inițială l_0.

σ_c — limita de curgere sau efortul unitar la care alungirea epruvetei crește pentru prima dată, fără ca sarcina să crească.

σ_r — rezistența de rupere a materialului.

Curba caracteristică a *oțelului* (fig. 19) la solicitarea de compresiune este, în general, identică cu cea de întindere; ea se reprezintă în cadranul III.

Curba caracteristică la compresiune a *fontei* (fig. 20) arată că ea rezistă mult mai bine la compresiune (cadranul III) decît la întindere (cadranul I).

Ecuația porțiunii rectilinii OA a curbei caracteristice din figura 19:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (26)$$

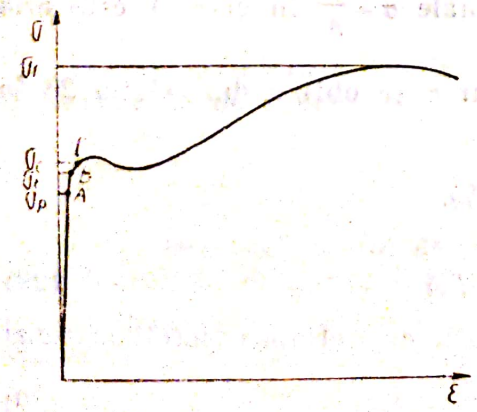


Fig. 19. Curba caracteristică a oțelului.

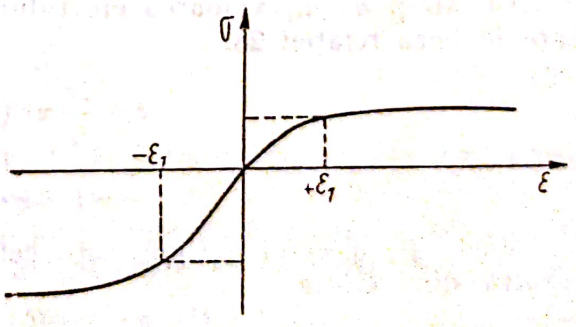


Fig. 20. Curba caracteristică a fontei.

Scanned with OKEN Scanner

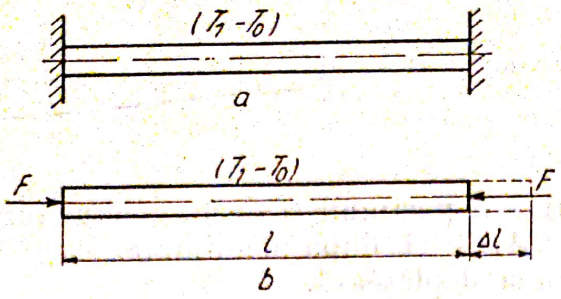


Fig. 21. Bară între doi pereți rigizi, încălzită de la T_0 la T_1.

poartă numele de *ecuația lui Hooke*, în care E este modulul de elasticitate sau modulul lui Young. E se exprimă în aceleași unități de măsură cu σ $\left[\frac{N}{m^2}\right]$ etc. ... Oțelurile au $E=2{,}1\times10^6\frac{daN}{cm^2}$.

Curba caracteristică de răsucire $(\tau;\gamma)$ pentru oțel este similară celei de întindere. Porțiunea rectilinie a acestei curbe, sub limita de proporționalitate este descrisă de ecuația

$$\tau=G\cdot\gamma \tag{27}$$

denumită *ecuația lui Hooke pentru solicitarea la răsucire*. Mărimea G se numește *modul de elasticitate transversal*. Pentru oțel $G=0{,}81+10^5\frac{daN}{cm^2}$.

Se consideră o bară rezemată între doi pereți rigizi (fig. 21) care nu permit nici o dilatare.

Dacă dilatarea ar fi liberă, bara încălzită de la temperatura T_0 la temperatura T_1, s-ar alungi cu Δl dat de relația

$$\Delta l=l_1-l_0=\alpha\cdot l_0\cdot(T_1-T_0) \tag{28}$$

Dilatarea fiind împiedicată, în bară se nasc forțe de compresiune care se opun dilatării. Situația reală din figura 21, *a* este echivalentă cu situația reprezentată în figura 21, *b* în care forțele F se opun dilatării. Ele înlocuiesc efectul pereților rigizi.

Prin urmare, împiedicarea dilatării dă naștere forțelor F de compresiune care determină eforturile unitare normale $\sigma=\frac{F}{A}$ în care A este aria secțiunii transversale a barei.

Cît timp $\sigma<\sigma_e$, valoarea efortului unitar σ se obține din relația 26 în care în baza relației 28:

$$\varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0}\alpha\cdot(T_1-T_0),$$

astfel că

$$\sigma=E\cdot\alpha\cdot(T_1-T_0) \tag{29}$$

Forța F, a cărei acțiune este echivalentă cu acțiunea pereților rigizi rezultă din relația

$$F=\sigma\cdot A=E\cdot\alpha\cdot A(T_1-T_0) \tag{30}$$

Exemplu de calcul. Șinele sudate ale unei linii de tramvai au fost montate la temperatura $T_0=10°C$. Ce eforturi unitare se vor produce în ele cînd

Scanned with OKEN Scanner

temperatura exterioară este $T_1 = 40°C$. Şinele sînt din oţel şi au $\alpha = 1{,}2 \times 10^{-5} grd^{-1}$.

Deoarece şinele sînt sudate, dilatarea lor este împiedicată. Datorită împiedicării deformaţiei, în şine se naşte efortul unitar, dat de relaţia (29)

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_0) = 2{,}1 \times 10^6 \times 1{,}2 \times 10^{-5} \times (40 - 10) = 756 \frac{daN}{cm^2}$$

f. Rezistenţe admisibile şi coeficienţi de siguranţă

Pe baza curbei caracteristice a materialului şi a condiţiilor de solicitare a piesei dintr-o maşină sau dintr-un aparat, se stabileşte valoarea maximă permisă a efortului unitar în piesa considerată. Deoarece este necesar ca deformaţiile pieselor să fie mici şi să aibe, în general, caracter elastic se impune ca

$$\sigma < \sigma e, \tag{31}$$

Valoarea maximă admisibilă pentru eforturile unitare într-un caz dat de solicitare, se numeşte *rezistenţă admisibilă*. Ea este o mărime convenţională care depinde de tipul solicitării, de forma piesei, de condiţiile solicitării, de exactitatea schemei de calcul considerate, de omogenitatea materialului etc. şi se notează cu σ_a — efortul unitar normal admisibil şi cu τ_a — efortul unitar tangenţial admisibil.

În general

$$\sigma \leqslant \sigma_a < \sigma_e$$

şi (32)

$$\tau \leqslant \tau_a < \tau_e$$

În lipsa unor date practice certe, rezistenţa admisibilă se calculează pe baza valorilor particulare de pe curba caracteristică. Pentru materialele tenace, care au limită de curgere σ_c, rezistenţa admisibilă se calculează în funcţie de aceasta,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_c}{c_c} \tag{33}$$

Pentru materialele fragile, rezistenţa admisibilă se calculează în funcţie de rezistenţa de rupere, σ_r:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{c_r}, \tag{34}$$

în care c_c este coeficientul de siguranţă faţă de limita de curgere, iar c_r este coeficientul de siguranţă faţă de rezistenţa de rupere.

În general, la metale, rezistenţele admisibile de forfecare şi de răsucire reprezintă circa 70—80% din cele de întindere şi de încovoiere:

$$\tau_a = (0{,}7 - 0{,}8)\sigma_a \tag{35}$$

Calculul de dimensionare al pieselor se face pe baza rezistenţei admisibile a materialului.

Aplicații

1. Să se determine raza unei bare circulare supusă la întindere cu o forță $F=1{,}1\times10^3$ daN. Bara este construită din oțel cu $\sigma_a=1\,400\ \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$.

Efortul unitar normal determinat de forța F trebuie să fie mai mic decît σ_a. Din relația (2) în care se pune $S=F$ și din condiția $\sigma\leqslant\sigma_a$ se obține

$$\frac{F}{A}\leqslant\sigma_a \text{ sau } A\geqslant\frac{F}{\sigma_a}$$

Deoarece $A=\pi R^2$ rezultă

$$R\geqslant\sqrt{\frac{F}{\pi\cdot\sigma_a}}=\sqrt{\frac{110\,000}{\pi\times1\,400}}=5\text{ cm}$$

Raza minimă admisibilă este $R=5$ cm.

2. Să se calculeze aria suprafeței de contact a plăcilor din figura 6, lipite între ele cu un adeziv, astfel ca acestea să nu se desprindă sub efectul forțelor de forfecare $F=100\,000$ N. Efortul unitar de forfecare admisibil al adezivului $\tau_a=200\ \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$.

Efortul unitar de forfecare provocat de forțele F trebuie să îndeplinească condiția $\tau\leqslant\tau_a$. Cu această condiție din relația (3) în care s-a pus $T=F$, rezultă

$$A\geqslant\frac{F}{\sigma_a}=\frac{100\,000}{2\,000}=50\text{ cm}^2$$

Aria minimă necesară $A=50$ cm².

Calculul de verificare al unei piese cu dimensiunile cunoscute constă în determinarea efortului unitar efectiv (real), σ, corespunzător condițiilor date de solicitare. Acest efort unitar se compară apoi cu eforul critic (de rupere, de curgere etc.) și se obține *coeficientul de siguranță* pentru cazul concret considerat:

$$c_r'=\frac{\sigma_r}{\sigma_{ef}}\text{ sau }c_c'=\frac{\sigma_c}{\sigma_{ef}}\qquad(36)$$

Se consideră că piesa este verificată din punct de vedere al rezistenței dacă coeficienții de siguranță efectivi (c_r', c_c' etc.) sînt inferiori coeficienților de siguranță admisibili (c_r, c_c), respectiv

$$c_r'\leqslant c_r$$
$$c_c'\leqslant c_c\qquad(37)$$

Valorile coeficienților de siguranță sînt cu atît mai mari cu cît materialul este mai neomogen. Aceste valori depind și de destinația și de importanța piesei, ca și de precizia prelucrării execuției și montării piesei.

De exemplu:

— pentru cazane rezervoare, recipiente, conducte din oțel

$$c_r=2{,}6\text{ și }c_c=1{,}5;$$

— pentru construcții de mașini în general

$$c_r=2{,}0-4{,}0\text{ și }c_c=1{,}3-2{,}0.$$

Exemple de calcul

1. Să se verifice un corp sferic de rază $R=1$ m și grosimea peretelui $\delta=10$ mm, construit dintr-un material tenace cu $\sigma_c=2\cdot200\ \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$. Corpul este solicitat de o presiune interioară $p=20\ \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$.

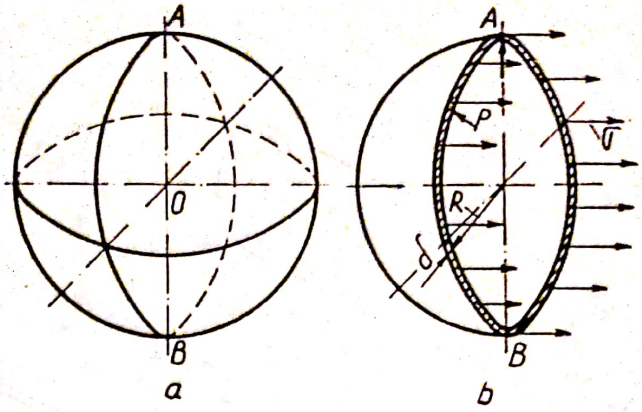


Fig. 22. Corp sferic supus presiunii interne, p.

Corpul sferic (fig. 22, *a*) se secționează printr-un plan diametral AB. Semisfera din stînga spre a fi în echilibru, pe circumferința de separare, se introduc forțele interioare, care înlocuiesc acțiunea semisferei din dreapta, decupată și îndepărtată. Forțele interioare fiind uniform distribuite pe circumferință ele se înlocuiesc cu eforturile unitare corespunzătoare σ (Fig. 22, *b*).

Prin reglarea, datorită echilibrului semisferei, a forței datorită presiunii interioare $F_p = p \cdot \pi \cdot R^2$ cu forța interioară F determinată de efortul unitar $F = \sigma 2\pi R\rho$ rezultă:

$$\sigma = \frac{p \cdot R}{2\delta} \tag{38}$$

În cazul considerat

$$\sigma = \frac{20 \cdot 100}{2 \cdot 1} = 1\,000 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$$

încît

$$c_c' = \frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{2 \cdot 200}{1 \cdot 100} = 2{,}2$$

Deoarece $c_c' > c_c = 1{,}5$ înseamnă că sfera rezistă la presiunea la care este solicitată.

2. Să se verifice o conductă (fig. 23, *a*) de bază R — 0,5 m și cu peretele de grosime δ — 5 mm, construită din oțel cu $\sigma_c = 2 \cdot 200 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$ în cazul solicitării la o presiune interioară $p = 16 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$.

Se secționează conducta printr-un plan ABA_1B_1. Pe semicilindrul din stînga planului se introduc forțele de interacțiune uniform distribuite σ_2. Ele echilibrează acțiunea presiunii pe semicilindrul care a fost îndepărtat: $F_p = p \cdot A$, în care $A = 2R \cdot l$ este proiecția suprafeței semicilindrului pe planul diametral. Eforturile unitare σ_2 determină o forță $F_{\sigma_2} = \sigma_2 2l\delta$ în care $2 \cdot 1 \cdot \delta$ reprezintă aria secțiunii transversale a peretelui cilindrului. La echilibru $F_p = F_{\sigma_2}$ de unde se obține:

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot R}{\delta} \tag{39}$$

În mod analog, dacă se consideră conducta închisă cu un capac, în secțiunea BB_1, atunci forța F determinată de presiune pe acest capac va fi echilibrată de forța interioară, uniform distribuită F_{σ_1}. Aceasta rezultă din (fig. 23, *b*) $F_{\sigma_1} = \sigma_1 \cdot A_1$ unde $A_1 = 2 \cdot \pi R \cdot \delta$. Deoarece $F = p \cdot \pi R^2$ din relația de echilibru $F = F_{\sigma_1}$ se obține

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot R}{2\delta} \tag{40}$$

Din compararea ultimelor două relații rezultă că $\sigma_2 = 2\sigma_1$.

În cazul analizat al unei conducte cu perete subțire ($\delta \ll R$) solicitată la presiune interioară, în peretele conductei apar eforturi unitare normale pe două direcții perpendiculare (σ_1 — pe

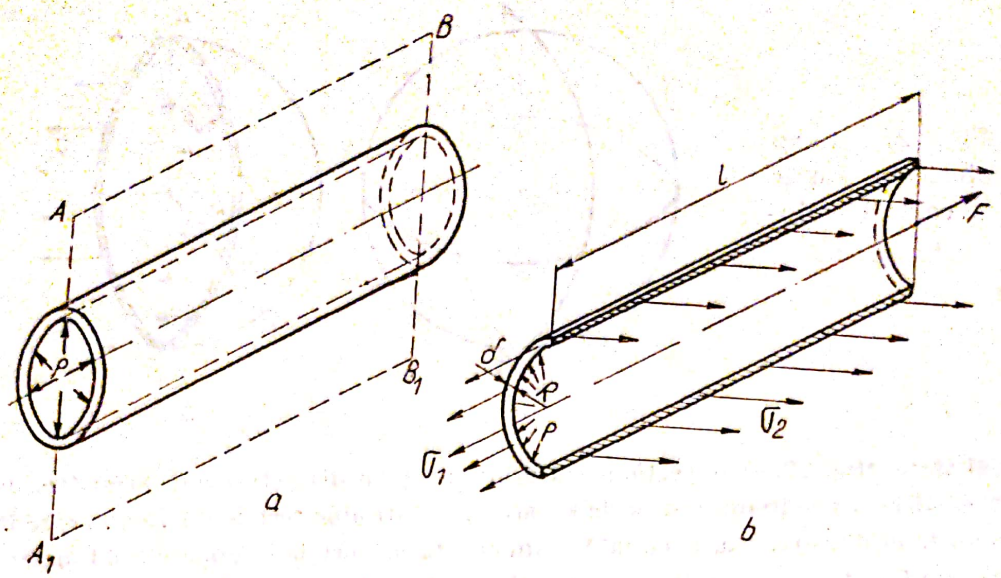


Fig. 23. Corp cilindric (conductă) supusă presiunii interne, *p*:
a — conductă secţională; *b* — conductă închisă cu capac.

direcţia generatoarei şi σ_2 — pe direcţia inelară). Cele două eforturi unitare acţionează într-un plan. Starea de eforturi unitare este, în consecinţă, o stare plană sau biaxială de eforturi unitare. Pentru a se compara această stare plană de eforturi unitare (σ_1, σ_2) cu cea de întindere simplă se calculează efortul unitar echivalent σ_{ech}, al stării plane de eforturi unitare. Aceasta este necesar, deoarece rezistenţa de rupere şi limita de curgere a materialului se obţin în experienţa de întindere simplă.

Efortul unitar echivalent, care urmează a fi comparat cu rezistenţa critică a materialului rezultă, în cazul unei asemenea solicitări plane (sau biaxiale), din relaţia

$$\sigma_{ech}=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2-\sigma_1\cdot\sigma_2} \tag{41}$$

Dacă se ţine seama că pentru conductă $\sigma_2=2\sigma_1$, rezultă:

$$\sigma_{ech}=\sigma_1\sqrt{3} \tag{42}$$

În urma înlocuitorilor

$$\sigma_{ech}=\frac{p\cdot R}{\delta}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}=\frac{16\cdot 50}{0{,}5}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}=1\,384\ \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$$

Coeficientul de siguranţă

$$c_c'=\frac{\sigma_c}{\sigma_{ech}}=\frac{2\cdot 200}{1\,384}=1{,}59$$

Deoarece $c_c'>c_c=1{,}5$, conducta rezistă solicitării căreia îi este supusă.

2. ORGANE DE MAŞINI

Organele de maşini sînt părţi constructive care, cu aceeaşi formă sau cu formă asemănătoare, intră în compunerea diferitelor maşini, agregate şi mecanisme.

Scanned with OKEN Scanner

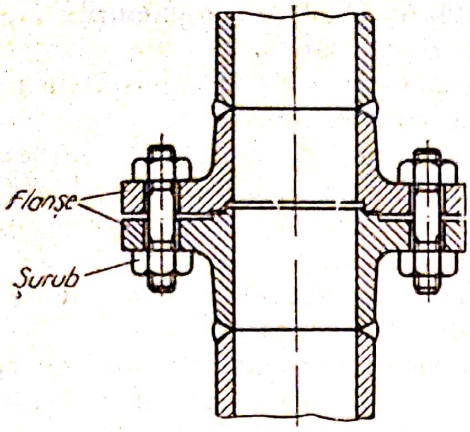


Fig. 24. Asamblarea demontabilă a două conducte, prin intermediul șuruburilor și a flanșelor.

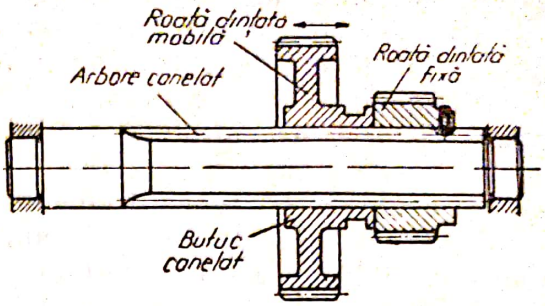


Fig. 25. Asamblarea pe un arbore canelat a două roți dințate.

Un organ de mașină poate fi *simplu*, adică format dintr-o singură piesă; de exemplu un *șurub* care asamblează două piese (fig. 24) sau un arbore canelat pe care se asamblează o roată dințată (fig. 25), roata dințată sau arborele însuși.

Dar un organ de mașină poate fi *compus* din mai multe piese. De exemplu, lagărele pe care se reazemă arborii; biela care face legătura între arbore și piston în mecanismul motor cu bielă-manivelă etc. Construcția cuzineților lagărelor, de exemplu, din două, trei sau patru bucăți, este determinată de posibilitățile de montaj și de reglaj. Pe de altă parte datorită utilizării cuzineților corpul lagărului și capacul sînt separate; asamblarea lor se face cu ajutorul șuruburilor.

Folosirea organelor de mașini a început din timpuri foarte vechi, odată cu roata, osia și lagărul primelor care. Apoi scripeții, au fost utilizați la construcția templelor și a piramidelor în China Antică și în Egipt. În Grecia Antică, pe vremea lui Aristotel și Platon, erau cunoscute fusurile metalice, roțile dințate și manivelele. Datorită rolului important al organelor de mașini în viața oamenilor și, mai tîrziu, în progresul tehnicii și dezvoltarea industriei, ele au fost continuu perfecționate; au fost de asemenea inventate organe de mașini noi. Procesul de perfecționare și de realizare de noi organe de mașini se află în continuă desfășurare.

a. Clasificarea organelor de mașini

Organele de mașini, după rolul funcțional, pot fi clasificate astfel:

— *Organe de asamblare*, care pot fi: nedemontabile (odată efectuată asamblarea ea nu mai poate fi desfăcută, de exemplu îmbinări prin nituire, îmbinări prin sudare, îmbinări prin lipire și prin încleiere); demontabile (asamblarea poate fi desfăcută relativ ușor, de exemplu: asamblări prin pene, bolțuri și știfturi, asamblări prin șuruburi, asamblări cu brățară elas-

tică etc.); fără distrugerea elementelor asamblate, elastice (de exemplu arcuri cu foi, arcuri elicoidale, bare de torsiune, arcuri disc).

— *Organe specifice mișcării de rotație*, cum sînt: osiile și arborii, fusurile, lagărele (de alunecare și de rostogolire) și cuplajele.

— *Organe pentru realizarea transmisiilor mecanice*, ca roți cu fricțiune, angrenaje (roți dințate), transmisii prin curele și transmisii prin lanțuri).

— *Organe pentru transformarea mișcării de translație în mișcare de rotație* sau organele mecanismului cu bielă și manivelă.

— *Organe pentru conducerea și închiderea circulației fluidelor*, care se referă la conducte și organe de închidere (robinete, vane).

Alegerea tipului de organ de mașină, într-un caz dat, depinde de construcția mașinii sau a subansamblului din care face parte organul de mașină, de posibilitățile de montare și demontare etc.

De exemplu dacă un organ de mașină, în procesul de exploatare trebuie demontat pentru revizia, curățarea sau înlocuirea părților uzate, el va fi prevăzut cu asamblări demontabile care se realizează cu ajutorul șuruburilor, penelor etc.

b. Standardizarea organelor de mașini

Standardizarea înseamnă tipizarea producției prin introducerea unor documente normative, denumite standarde, care trebuie respectate în mod obligatoriu. Standardizarea are o foarte mare importanță în construcția de mașini precum și, în general, în economia națională.

Rolul standardizării este de a introduce ordine în producție, ceea ce are ca efect: asigurarea unui anumit nivel (standard) al calității produselor, reducerea costului de producție, ușurarea legăturii dintre producător și consumator, reducerea timpului de procurare a materialelor, a pieselor, ca și reducerea timpului de înlocuire a pieselor uzate.

Prin standardizare se face și *tipizarea* organelor de mașini. Prin aceasta se limitează tipurile de organe de mașini admise a fi fabricate, iar pentru un tip dat se stabilesc numai anumite dimensiuni (mai des utilizate în practică). Tipurile de organe de mașini și dimensiunile acestora standardizate se fabrică în mod curent și ele pot fi procurate cu ușurință de la fabricile constructoare sau din magaziile întreprinderilor consumatoare. În acest mod prin standardizare se asigură posibilitatea interschimbabilității pieselor, se micșorează numărul de sortimente, se asigură scurtarea duratei de întrerupere a funcționării instalațiilor (în caz de avarii), deoarece existența pieselor standardizate scurtează termenele de procurare a acestora.

Prin interschimbabilitate se înțelege capacitatea organelor de mașini fabricate independent, de a-și ocupa locurile corespunzătoare în ansamblul mașinii, fără o prelucrare suplimentară și de a asigura o funcționare de calitate.

Anumite ansambluri sînt uneori tipizate, ceea ce permite executarea mașinilor prin asamblarea lor din diferite *ansambluri-agregat*. Fabricarea în serie a ansamblurilor-agregat ca și a organelor de mașini standardizate, asigură ieftinirea considerabilă a acestora și permite accelerarea fabricării mașinilor.

Scanned with OKEN Scanner

c. Coeficienți de siguranță la organele de mașini

Datorită formei organului de mașină, a incertitudinii schemei de calcul adoptate cît și a incertitudinii solicitărilor la care este supus acesta, coeficientul de siguranță (sau rezistența admisibilă) devine uneori mărime specifică tipului de organ de mașină considerat.

Coeficientul de siguranță, alături de rezistența la uzură determină durata de funcționare a organului de mașină.

Coeficientul de siguranță se referă la condițiile reale, specifice ale piesei. Caracteristicile mecanice ale materialului piesei (σ_c, σ_r) se determină pe epruvete în condițiile unor încercări simple. Datorită formei sale, organele de mașini sînt solicitate și se deformează, în mod diferit în comparație cu epruveta. Ca urmare, ținînd seama și de importanța și rolul organului de mașină în componența mașinii sau aparatului, se utilizează coeficienți de siguranță (uneori rezistențe admisibile) specifici anumitor tipuri de organe de mașini.

De exemplu, pentru asamblări prin șuruburi coeficientul de siguranță, se ia $c=1{,}25 \ldots 3{,}0$ și chiar mai mare, după scopul și importanța asamblării, ca și în funcție de diametrul șurubului. Cînd forțele care solicită șurubul sînt precis cunoscute și montajul se face corect, se acceptă $c=1{,}25 \ldots 1{,}75$. Dacă aceste condiții nu sînt îndeplinite se recomandă $c=1{,}75 \ldots 3{,}0$ și anume: pentru șuruburi cu diametrul $d \leqslant 14$ mm datorită pericolului smulgerii la montare se ia $c=2{,}5 \ldots 3{,}0$; iar pentru șuruburi cu $d>14$ mm se recomandă $c=1{,}75 \ldots 2{,}50$.

d. Noțiuni de toleranțe și ajustaje

Organele de mașini nu pot fi executate cu precizie absolută. O dimensiune oarecare a unei piese, înscrisă pe desen, se numește *dimensiune nominală* (sau prescrisă). Dimensiunea nominală nu poate fi realizată și măsurată cu precizie matematică. Rezultatul măsurării unei piese dă *dimensiunile efective.*

În general piesa poate funcționa și își poate îndeplini rolul în bune condițiuni dacă dimensiunea efectivă este cuprinsă între două *dimensiuni limită,* una *maximă* și una *minimă.* Diferența dintre cele două dimensiuni se numește *toleranță* și se notează cu T. Toleranța se prescrie de către cel care proiectează organul de mașină. Toleranța trebuie respectată de către cel care execută piesa.

Diferența dintre dimensiunea efectivă și cea nominală se numește *abatere efectivă,* care poate fi pozitivă sau negativă. De exemplu, se prescrie pentru un arbore diametrul $d_n=200$ mm. După execuția lui se constată, prin măsurare, că diametrul efectiv $d'=200{,}02$ mm. Abaterea efectivă diametrală este deci $A=d'-d=0{,}02$ mm.

Se presupune că într-un disc circular trebuie executat un *alezaj* (o gaură sau un orificiu) cu diametrul nominal D_n. Pentru ca piesa să poată funcționa corect, alezajul trebuie să fie mai mic decît D_{max}, dar mai mare decît D_{min}.

Scanned with OKEN Scanner

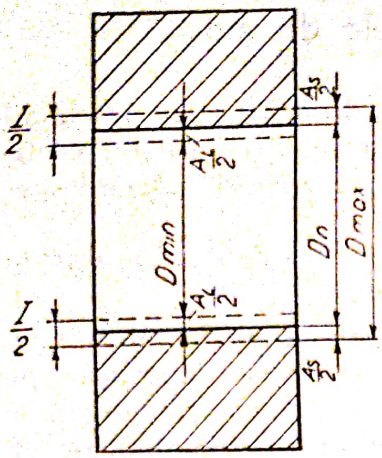


Fig. 26. Cîmpul de toleranțe la un alezaj.

$$D_{min} \leqslant D_n \leqslant D_{max} \tag{43}$$

Aceasta înseamnă că dimensiunea efectivă nu trebuie să depășească anumite *abateri limită* admise, și anume (fig. 26);
abaterea superioară:

$$A_s = D_{max} - D_n \tag{44}$$

și abaterea inferioară:

$$A_i = D_{min} - D_n \tag{45}$$

Toleranța dimensiunii nominale D_n reprezintă diferența:

$$T = D_{max} - D_{min} \tag{46}$$

În sistemul internațional ISO (adoptat din 1969 și în țara noastră) cîmpul de toleranță se indică prin una sau două litere care definesc *poziția* cîmpului de toleranță, urmată de una sau două litere care indică *mărimea* sau precizia acestuia. Pentru arbori se folosesc litere mici (de exemplu g7, h6, etc.), iar pentru alezaje litere mari (de exemplu B8, D11 etc.). Simbolul cîmpului de toleranță se scrie după dimensiunea nominală. De exemplu, pentru un arbore cu $d_n = 50$ mm se scrie 50 g7. Dacă se înscriu pe desen valorile abaterilor limită superioară și inferioară (a_s și a_i în cazul arborilor), atunci pentru cazul precedent se scrie $50^{+0,02}_{-0,01}$ în care

$$a_s = d_{max} - d_n = +0,02 \text{ mm}$$

$$a_i = d_{min} - d_n = -[illegible],01 \text{ mm}$$

Toleranța prescrisă pentru dimensiune nu trebuie confundată cu calitatea sau finețea suprafeței (adică cu gradul ei de netezime). La o piesă prelucrată grosolan, înălțimea neregularităților de pe suprafață, rămase din prelucrare, poate depăși cîmpul de toleranțe prescris. Într-un asemenea caz nu are sens prescrierea unei toleranțe severe. Dacă toleranța severă este necesară, atunci și calitatea suprafeței trebuie să corespundă unei neregularități mici. Deci, toleranța și calitatea prescrise unei piese sînt mărimi corelate.

Ajustaje. La asamblarea a două piese în contact, una din suprafețe — denumită cuprinzătoare — îmbracă pe cealaltă — denumită cuprinsă. De exemplu contactul dintre arbore și bucșă sau cuzinet (fig. 27, *a*), denumit contact alezaj-arbore.

Diferența dintre dimensiunile celor două piese, înainte de asamblare, se numește *ajustaj*. Ajustajul poate fi cu joc, cu strîngere sau intermediar.

Ajustajul este cu joc cînd cîmpul de toleranță T, al alezajului este în întregime deasupra cîmpului de toleranță t, al arborelui. Prin aceasta se asigură întotdeauna un joc (fig. 27, *b*). În acest caz, întotdeauna $d_{max} < D_{min}$. Jocul J reprezintă diferența dintre diametrele efective, al alezajului, D și al arborelui, d.

$$J = D - d \tag{47}$$

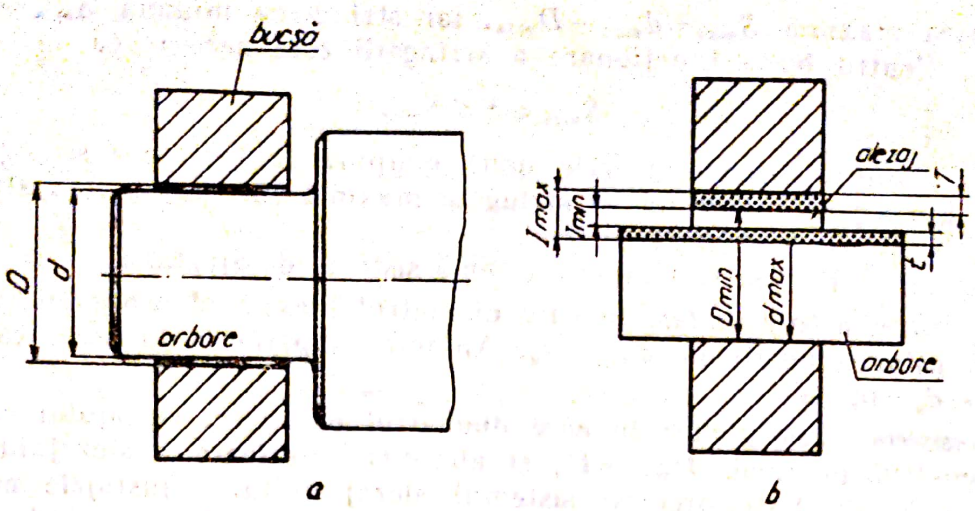


Fig. 27. Subansamblu arbore-bucşă (*a*) şi ajustaj cu joc (*b*).

şi îndeplineşte condiţia

$$J_{min} \leqslant J \leqslant_{max} \tag{48}$$

Jocul maxim $J_{max}=D_{max}-d_{min}$, iar jocul minim $J_{min}=D_{min}-d_{max}$.

Ajustajul este cu strîngere atunci cînd cîmpul de toleranţă al alezajului T se află în totalitatea lui dedesubtul cîmpului de toleranţe al arborelui t (fig. 28, *a*). Deci întotdeauna $d>D$, ceea ce asigură realizarea strîngerii. Strîngerea S reprezintă diferenţa dintre diametrul arborelui şi al alezajului.

$$S=d-D \tag{49}$$

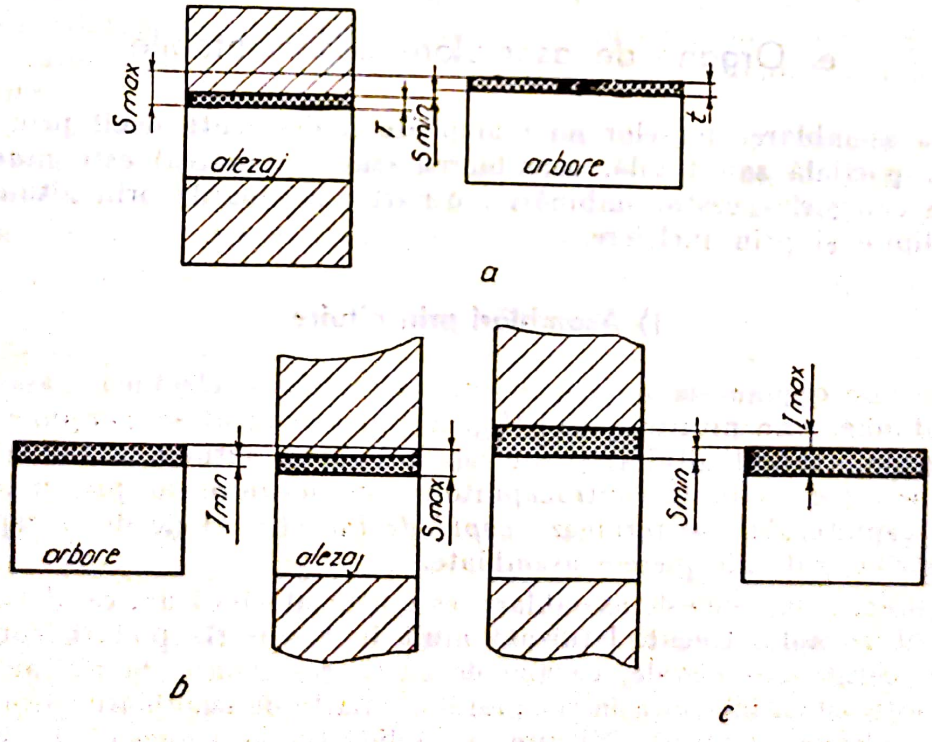


Fig. 28. Ajustaj cu strîngere (*a*) şi ajustaje cu joc sau cu strîngere (*b*, *c*).

Strîngerea maximă $S_{max}=d_{max}-D_{min}$, iar strîngerea minimă $S_{min}=d_{min}-D_{max}$. Pentru buna funcţionare a strîngerii este necesar ca

$$S_{min} \leqslant S \leqslant S_{max} \qquad (50)$$

La ajustajul intermediar cele două cîmpuri de toleranţe se suprapun parţial putînd da joc minim şi strîngere maximă (fig. 28, *b*) sau strîngere minimă şi joc maxim (fig. 28, *c*).

În cadrul ISO au fost adoptate două sisteme de ajustaje:

— *sistem arbore unitar*, în care diametrul maxim al arborelui coincide cu dimensiunea nominală, $d_{max}=d_n$. Abaterea superioară în acest caz $a_s=d_{max}-d_n=0$;

— *sistem alezaj unitar* în care diametrul minim al alezajului coincide cu diametrul nominal, $D_{min}=D_n$ şi abaterea inferioară a alezajului $A_i=D_{min}-D_n=0$. Este preferat sistemul alezaj unitar. Ajustajele necesare (cu joc, cu strîngere sau intermediar) în acest caz, se obţin variindu-se mărimea şi poziţia cîmpului de toleranţe al arborelui faţă de *linia zero* cum este considerată linia care materializează diametrul nominal.

Simbolizarea ajustajului se face înscriind după dimensiunea nominală (comună celor două piese asamblate), simbolurile toleranţelor lor. De exemplu, pentru diametrul nominal de 50 mm se scrie $50\frac{H8}{h7}$, în care H8 este simbolul cîmpului de toleranţe al ajustajului (el se scrie deasupra şi cu literă mare), iar h7 este simbolul cîmpului de toleranţe al alezajului (el se scrie dedesubt şi cu literă mică).

e. Organe de asamblare nedemontabile

Dacă asamblarea pieselor nu mai poate fi desfăcută decît prin distrugerea lor parţială sau totală, asamblarea (sau îmbinarea) este *nedemontabilă*. Din categoria acestor îmbinări fac parte: îmbinările prin nituire, prin sudare, lipire şi prin încleiere.

1) Asamblări prin nituire

Nitul este organul de maşină cu ajutorul căruia se efectuează asamblarea nedemontabilă, prin nituire. Nitul (fig. 29, *a*) nemontat se compune dintr-o tijă cilindrică (corpul nitului) şi un cap iniţial. La nituire, capul nitului se sprijină pe o piesă numită contracăpuitor: prin ciocănire sau prin presare, cu ajutorul căpuitorului, se formează *capul de închidere*. Cele două capete ale nitului strîng puternic piesele asamblate.

Nituirea, ca metodă de asamblare, este utilizată încă din cel de-al treilea deceniu al secolului trecut. Utilizată mult în trecut (la poduri, construcţii metalice, construcţii navale, cazane de abur, rezervoare, la avioane etc.), nituirea este astăzi înlocuită în cea mai mare parte de asamblările prin sudare, lipire şi încleiere cu adezivi. Nituirea se aplică totuşi atunci cînd îmbinările sînt supuse la vibraţii puternice sau la şoc, cînd materialele sînt nesudabile sau nu admit încălziri puternice.

Scanned with OKEN Scanner

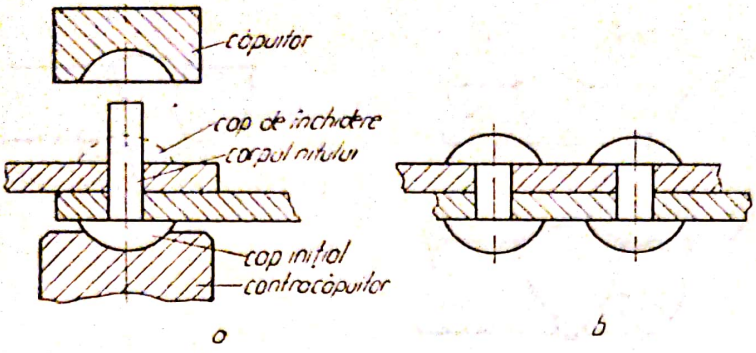


Fig. 29. Imbinare nedemontabilă cu nituri: *a* — nit nemontat; *b* — nit montat.

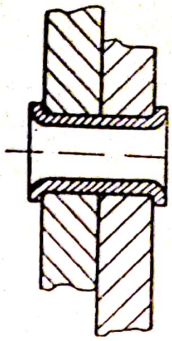


Fig. 30. Imbinare nedemontabilă cu nit tubular.

După forma capului, niturile pot fi cu cap semirotund, cu cap tronconic, cu cap semiînecat, cu cap plat etc. După forma corpului nitul poate fi cu corpul plin (fig. 29) sau nit tubular (fig. 30).

2) Asamblarea prin sudare

Asamblarea prin sudare constă în îmbinarea, nedemontabilă, a două piese, care se obține prin încălzirea pînă la topirea suprafețelor alăturate, care urmează a fi asamblate. Sudarea se poate face cu sau fără adaos de material. Adaosul de material provine dintr-un electrod sau din sîrmă specială a căror compoziție depinde de natura fizico-chimică a materialelor asamblate.

Sudarea celor două piese între ele, direct sau prin intermediul materialului de adaos se datorește forțelor de coeziune moleculară. Sudarea poate avea loc și prin presiune, cînd suprafețele ce urmează a se îmbina sînt aduse în stare plastică și presate una pe cealaltă.

În jurul cordonului de sudură apar zone cu structuri diferite datorită acțiunii temperaturii și a difuziunii materialului de adaos.

Sudarea se face manual, semiautomat sau automat. Procedeele cele mai răspîndite de sudare se bazează pe topirea metalului de adaos: sudare oxiacetilenică, cu arc electric, sudare electrică în baie de zgură etc. Actualmente se folosesc și unele procedee speciale de sudare cu jet de plasmă, cu laser, cu ultrasunete, cu fascicul de electroni.

Marginile tablelor metalice care urmează să fie sudate se prelucrează. Forma rostului (sau a secțiunii libere) dintre tablele așezate în vederea sudării, depinde de prelucrarea marginilor tablelor. Forma rostului depinde de grosimea tablelor și de procedeul de sudare adoptat (manual sau automat).

În figura 31 sînt reprezentate cîteva exemple de suduri cap la cap ale unor table *1* și *2*. Cu linie întreruptă s-a reprezentat forma marginilor tablelor înainte de sudare: table fără margini teșite *a* (se utilizează la table subțiri); table teșite pe o singură parte, care formează o canelură în formă de *V* (*b*); table teșite pe ambele părți, care formează o canelură în formă de *X* (*c*);

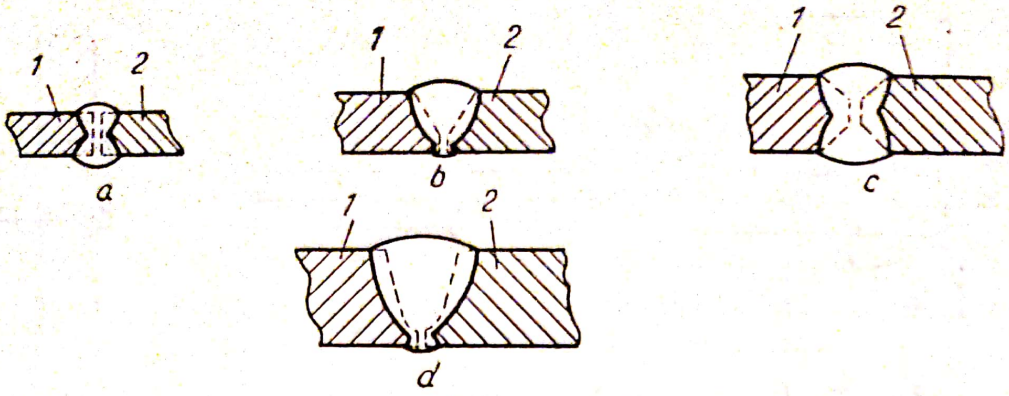


Fig. 31. Îmbinare nedemontabilă, prin sudare cap la cap a tablelor.

o canelură în formă de *U* (*d*) (se utilizează la sudarea manuală a tablelor cu grosimi mai mari de 20 mm).

Sudarea tablelor suprapuse (fig. 32, *a*) sau a unor piese perpendiculare (fig. 32, *b*) se face în general cu cusături (cordoane de sudură) în colţ.

În îmbinarea sudată se nasc eforturi unitare, dependente de tipul solicitării exterioare, şi anume:

σ_s — efortul unitar de tracţiune (sau compresiune) în îmbinarea sudată şi

τ_s — efortul unitar de forfecare în îmbinarea sudată.

În cordonul de sudură din figura 33, solicitat la întindere cu forţa F, apare efortul unitar:

$$\sigma_s = \frac{F}{l \cdot s} \tag{51}$$

Pentru a rezista este necesar ca $\sigma_s \leqslant \sigma_{sa}$, în care efortul unitar admisibil în cordonul de sudură:

$$\sigma_{sa} = k \cdot \sigma_a \tag{52}$$

în care: σ_a — efortul unitar admisibil pentru materialul de bază;

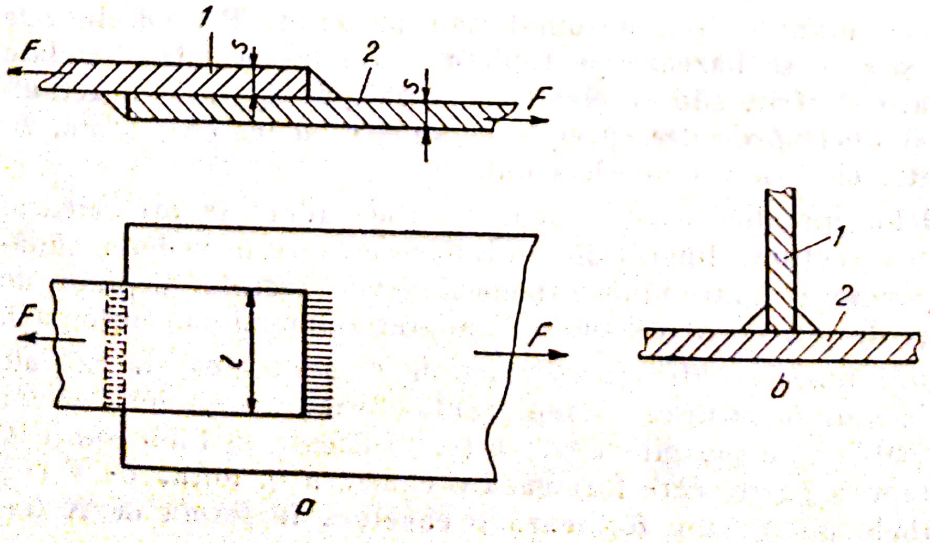


Fig. 32. Îmbinare prin sudare a tablelor suprapuse (*a*) şi a unor piese perpendiculare una pe cealaltă (*b*).

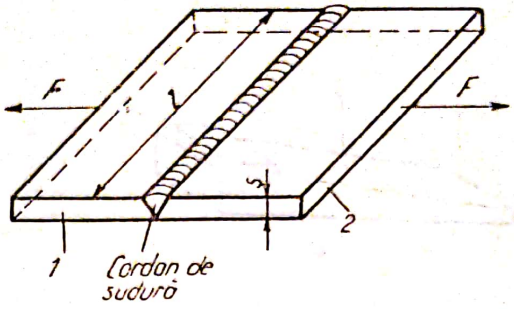


Fig. 33. Îmbinare prin sudare cap la cap a două table *1* și *2*.

k — coeficient de calitate și de formă al sudurii; în general $k \leqslant 1$.

În cazul solicitări la forfecare cu forța F (fig. 32, *a*), efortul unitar de forfecare în cordonul de sudură

$$\tau_s = \frac{F}{1{,}4 \cdot l \cdot s} \tag{53}$$

Este necesar ca $\tau_s \leqslant \tau_{s,a}$ în care $\tau_{s,a}$ este rezistența admisibilă la forfecare a cordonului de sudură.

f. Organe de asamblare demontabile

Asamblările demontabile permit montarea și demontarea repetată a pieselor fără deteriorarea lor. În acest scop se utilizează, în general, piese intermediare, ca: pene, știfturi (sau cuie), șuruburi, inele tronconice, asamblări prin caneluri sau cu profile speciale.

1) Pene

Penele au formă de prismă. Ele pot fi:

— *pene transversale*, care se montează perpendicular pe axa pieselor sau pe direcția sarcinii;

— *pene longitudinale*, care se montează paralel cu axa geometrică a pieselor de solidarizat.

Penele transversale *1* (fig. 34, *a*) sînt totdeauna prevăzute cu înclinare (pe o față sau pe ambele fețe). Ele se utilizează, de exemplu, pentru asamblarea

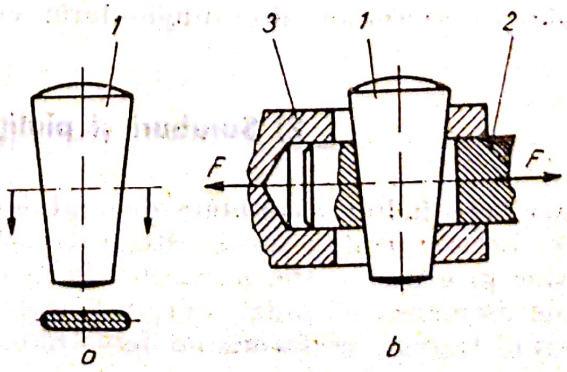


Fig. 34. Îmbinare demontabilă cu pană transversală:
a — pană;
b — asamblarea tijei pistonului cu capul de cruce.

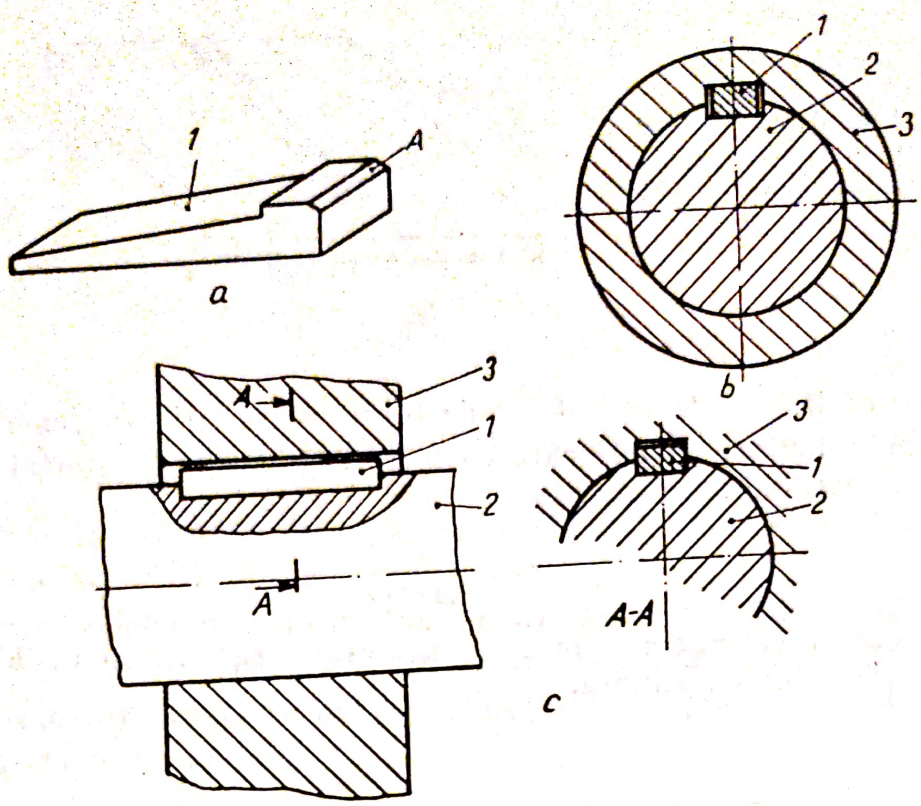


Fig. 35. Îmbinări demontabile cu pene longitudinale.

tijei pistonului *2* cu capul de cruce *3*, la mașinile cu abur și la pompe (fig. 34, *b*).

Pana longitudinală *1*, cu sau fără înclinare, se montează în canalele a două piese asamblate între ele (fig. 35). Ea împiedică rotirea unei piese în raport cu cealaltă. Penele longitudinale se folosesc în special pentru transmiterea momentelor de răsucire (sau torsiune) de la arborele *2*, la butucul *3*, sau invers.

Pana longitudinală poate avea un cap de batere (*A*) sau nu. Ea poate fi cu fețele paralele (fig. 35, *c*) sau cu o față înclinată (fig. 35, *a*).

Transmiterea momentului de răsucire, la pana longitudinală din figura 35, *b* se face prin strîngerea ce se realizează datorită apăsării exercitate de pană asupra fundului canalului din butuc, respectiv din arbore. Pana nu este în contact cu fețele laterale.

Pana longitudinală din figura 35, *c* transmite momentul de răsucire prin presiunea exercitată de butuc și arbore pe fețele lor laterale. Asemenea pene longitudinale au secțiunea dreptunghiulară: ele se numesc pene paralele.

2) Șuruburi și piulițe

Cele mai răspîndite asamblări demontabile sînt asamblările prin șuruburi. Caracteristic pentru șurub este filetul. Acesta este, o spiră elicoidală care se obține prin prelucrare, pe șurub. Între două spire ale filetului se află un canal, de asemenea elicoidal. Forma filetului în secțiune poate fi un triunghi, pătrat, trapez, în formă de ferăstrău sau poate fi rotund.

Scanned with OKEN Scanner

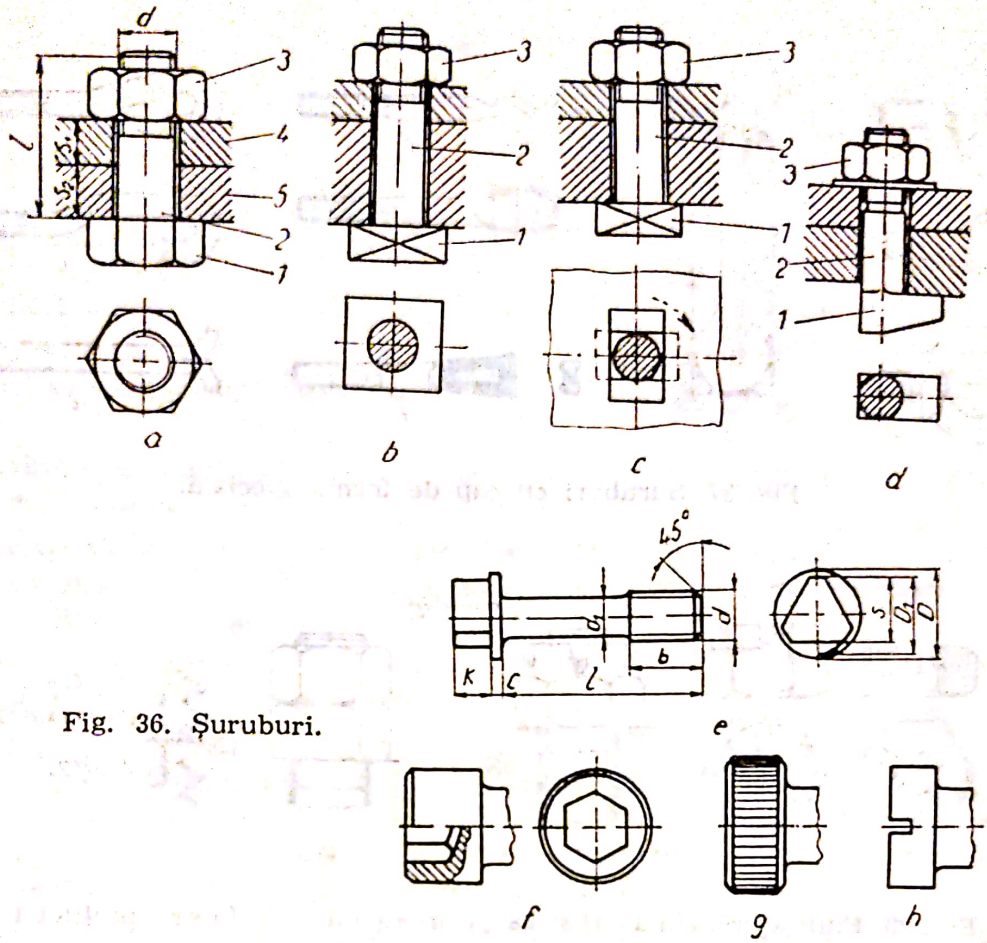


Fig. 36. Şuruburi.

Şurubul (fig. 36) este, în general, un corp cilindric prevăzut cu un cap de rezemare *1* şi un corp *2* filetat pe o anumită porţiune l_f. Pe porţiunea filetată se înşurubează o piuliţă *3* (fig. 36, *a*). Acesta permite strîngerea pieselor *4* şi *5*, între capul *1* al şurubului şi piuliţa *3*. Mărimile caracteristice ale şurubului sînt: filetul (diametrul, pasul, lungimea şi forma acestuia), forma şi dimensiunile corpului şurubului (cilindric sau conic) şi forma capului şurubului (hexagonal, pătrat, ciocan etc.). Cele mai răspîndite sînt şuruburile cu cap hexagonal (fig. 36, *a*). În timpul înşurubării, cu o cheie se ţine capul *1* al şurubului, iar cu altă cheie se roteşte piuliţa *3*.

Se mai utilizează şuruburi: cu cap pătrat (fig. 36, *b*) la maşini unelte, cu cap ciocan simetric (fig. 36, *c*) sau asimetric (fig. 36, *d*), cu cap triunghiular (fig. 36, *e*) cu cap striat (fig. 36, *f*), cu cap cilindric cu hexagon interior (fig. 29, *g*), cu cap crestat pentru şurubelniţă (fig. 36, *h*) etc.

Forma cheii de strîngere depinde de forma capului şurubului.

În diverse scopuri se utilizează şuruburi cu cap de anumite forme, şi anume:

— şurub cu cap fluture (fig. 37, *a*) uşor de manevrat (nu necesită cheie) întîlnit în construcţia dispozitivelor de prindere a diverselor aparate etc.;

— şurub cu ochi (fig. 37, *a*) cu un inel (fig. 37, *c*) prin care trece o tijă sau un cablu cu ajutorul cărora se ridică piese sau maşini grele în care este înşurubat un asemenea şurub;

— şurub pentru fundaţii *1* (fig. 37, *d*), cu capul în formă de cîrlig, care asigură prinderea în beton *2*. Trecerea unei tije cilindrice *3* prin capul cîr-

Scanned with OKEN Scanner

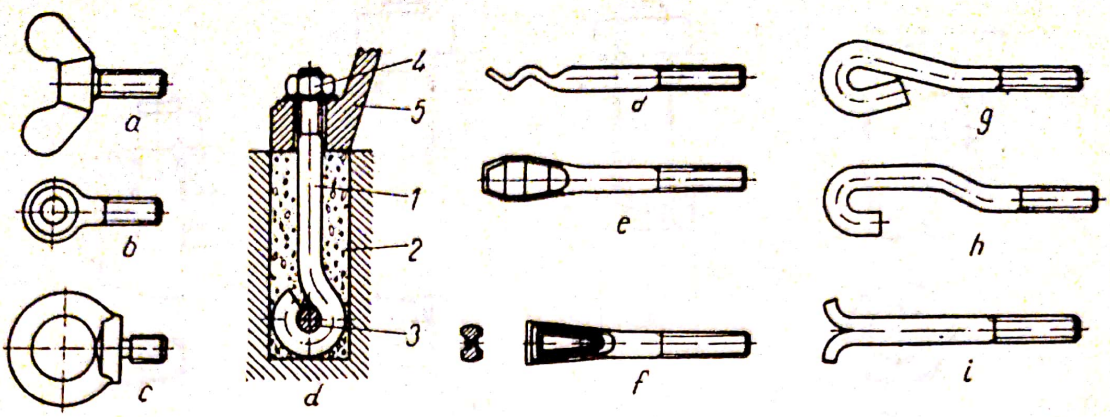


Fig. 37. Șuruburi cu cap de formă specială.

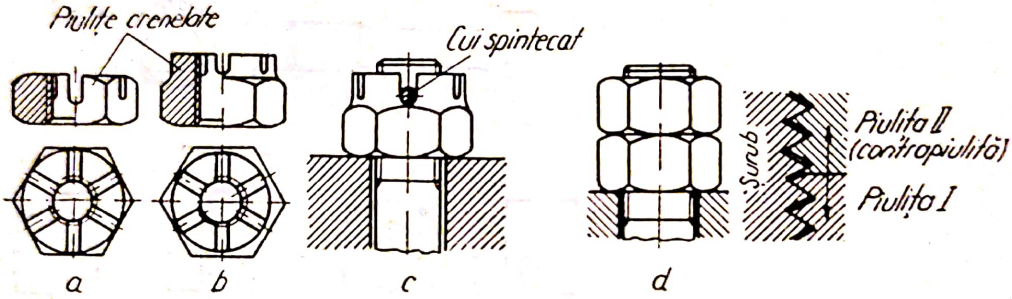


Fig. 38. Piuliță crenelată *(a)* și asigurarea contra desfacerii piuliței I, cu ajutorul contrapiuliței II (*b*).

lig asigură șurubul contra smulgerii din beton. Cu ajutorul piuliței 4 se solidarizează batiul *5* al unei mașini de fundația de beton.

Piulițele au, ca și capetele de șuruburi, forme foarte variate, după scop, spațiul disponibil și sistemul de asigurare. Piulița hexagonală (v. fig. 36, *b*) este cel mai frecvent utilizată.

Piulițele trebuie asigurate împotriva desfacerii lor de pe șurub. În acest scop se utilizează uneori piulițe crenelate (fig. 38, *a*), șaibe de siguranță, contrapiulițe etc.

Piulițele crenelate sînt prevăzute cu crestătură pe partea superioară, în scopul introducerii cuiului spintecat care, trecînd și prin șurub, le asigură contra desfacerii. Contrapiulița *2* (fig. 38, *c*) se montează după ce piulița *1* a fost strînsă în poziția fixă cu o cheie. Prin blocarea piuliței se asigură îmbinarea contra desfacerii.

g. Organele mișcării de rotație

Arborii și osiile sînt puse în mișcare de rotație pentru realizarea unui lucru util: rotirea rotorului unei pompe centrifuge, a rotorului unei turbine, a burghiului unei mașini de găurit, a elicei unui vapor etc.

Arborele *1* este prevăzut cu fusurile *2*, prin intermediul cărora se sprijină pe lagărele *3* (fig. 39, *a*). Arborii care se succed unul după celălalt

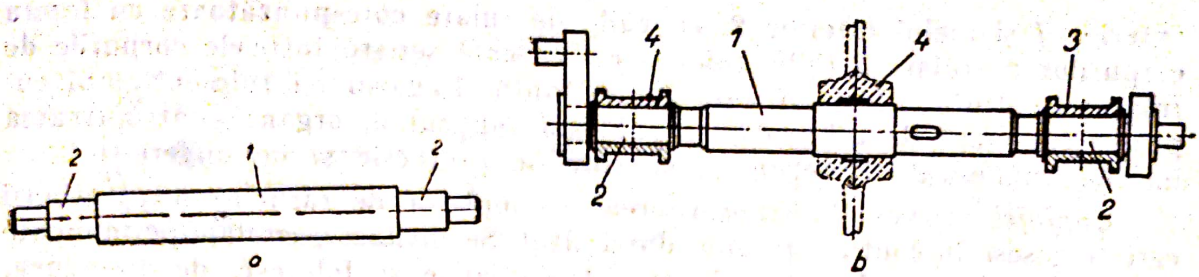


Fig. 39. Arborele *1* cu fusurile *2* (*a*) şi arborele 1 rezemat pe lagăre (*b*).

în serie) se asamblează între ei, în vederea transmiterii, cu ajutorul cuplajelor.

Arborii şi osiile, fusurile, lagărele şi cuplajele reprezintă organele mişcării de rotaţie.

Osiile susţin organe de maşini aflate în rotaţie sau oscilaţie, fără a transmite momente de răsucire. De exemplu, osia unui vagon de cale ferată se roteşte odată cu roata solidarizată pe ea.

Arborii se rotesc în jurul axei lor geometrice şi transmit momente de răsucire. Ei sînt solicitaţi în special la răsucire, dar şi la încovoiere.

Arborii din figura 39 sînt arbori drepţi. Se întîlnesc însă şi arbori cotiţi care se utilizează pentru transformarea mişcării de translaţie a pistonului în mişcare de rotaţie a arborelui (la motoare cu ardere internă) sau pentru transformarea mişcării de rotaţie a arborelui în mişcare de translaţie a pistonului (la pompe şi compresoare cu piston).

Lagărele servesc la susţinerea arborilor şi a osiilor care se rotesc. În funcţie de felul frecării, lagărele se împart în lagăre de alunecare şi lagăre de rostogolire.

Lagărele de alunecare, ca acelea din figura 40 *a*, *b*, lucrează în condiţiile alunecării relative a suprafeţei fusului pe suprafaţa lagărului. Cele două suprafeţe sînt separate printr-o peliculă de lubrifiant (ulei). Un lagăr de alunecare (fig. 44, *a*) se compune din corpul lagărului *1*, cuzinetul *2*, care susţine arborele *3* şi dintr-un sistem de ungere *4*.

Lagărele de rostogolire sînt echipate cu rulmenţi. Aceştia folosesc frecarea de rostogolire. Rulmenţii (fig. 40, *b*) sînt formaţi din următoarele piese: inelul

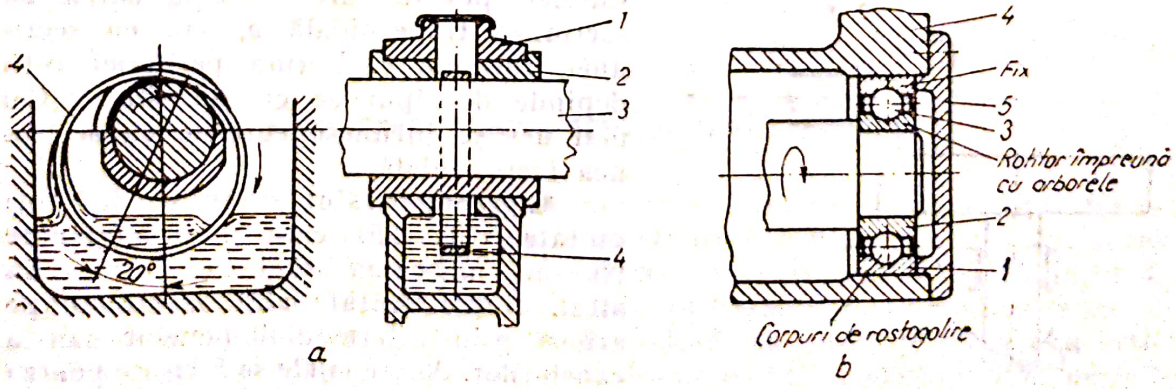


Fig. 40. Tipuri de lagăre:
a — lagăr de alunecare; *b* — lagăr de rostogolire.

Scanned with OKEN Scanner

exterior *1* şi inelul interior *2*, cu căile de rulare corespunzătoare cu forma corpurilor de rulare *3* (bile, role) şi colivii care separă între ele corpurile de rulare, menţinîndu-le la o anumită distanţă. Lagărul cu rulmenţi mai cuprinde (în afară de rulmenţi) corpul *4* şi capacul *5*, organe pentru fixarea inelelor rulmentului, precum şi sisteme de protecţie şi de ungere.

Cuplajele servesc la transmiterea momentelor de răsucire între arborii care se găsesc în continuare unul după altul. Se întîlnesc: cuplaje permanente cuplaje elastice, cuplaje mobile etc. Ambreiajele se folosesc, de asemenea, pentru cuplarea şi decuplarea a doi arbori aflaţi unul în continuarea celuilalt.

Cuplajele permanente sau fixe realizează o legătură rigidă între arbori. De exemplu un manşon sau o bucşă montată pe capetele celor doi arbori şi fixată de aceştia reprezintă un asemenea cuplaj fix.

Cuplajele elastice sînt formate din două semicuplaje montate pe fiecare capăt de arbore. Transmiterea mişcării (a momentului de răsucire) de la un semicuplaj la celălalt se face prin intermediul unor elemente elastice metalice sau nemetalice).

h. Organe de transmitere a mişcării

Pentru transmiterea mişcării între doi arbori care nu sînt unul în continuarea celuilalt se folosesc: roţi cu fricţiune, transmisii prin curele şi prin lanţuri şi angrenaje (roţi dinţate).

La **transmisiile cu fricţiune** mişcarea de la arborele conducător *1*, la arborele condus *2*, se face datorită forţelor de frecare care apar între rola *3* de pe arborele *1* şi discul *4* de pe arborele *2*. (fig. 41). Prin deplasarea rolei de-a lungul razei discului se poate modifica raportul dintre turaţiile n_1 şi n_2 ale celor doi arbori.

Transmisia prin curele (fig. 42), se compune dintr-o roată conducătoare *1*, o roată condusă *2* şi una sau, mai multe curele *3*, care înfăşoară roţile de transmitere. Datorită frecării dintre curele şi roţi, mişcarea şi respectiv momentul de răsucire se transmite de la roata *1* la roata *2*, prin intermediul curelelor *3*. Roţile *1* şi *2* sînt asamblate pe arborii *4* şi *5*, între care se transmite mişcarea, cu ajutorul unor pene *6* şi 7. Curelele pot fi: curele late *a*, curele cu secţiunea trapezoidală *b*, sau cu secţiunea rotundă *c*. Forma periferiei roţii depinde de tipul de curea utilizat. Cel mai des se întîlnesc curelele cu secţiunea trapezoidală.

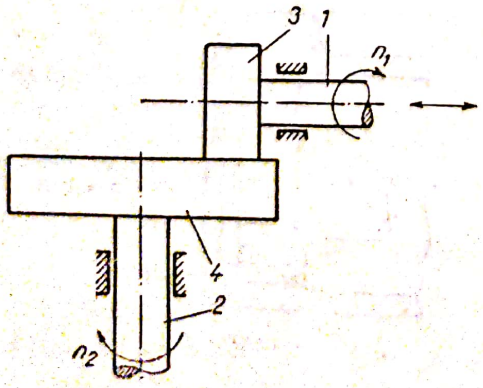


Fig. 41. Schema transmisiei cu roţi de fricţiune.

Angrenajele sînt compuse din roţi dinţate (fig. 25) care prin angrenare transmit mişcarea de la un arbore la altul. Roţile dinţate sînt asamblate pe arbori prin intermediul penelor sau a canelurilor. Angrenajele se folosesc pentru transmiterea mişcării de rotaţie între arbori cu axe paralele, concurente sau

Scanned with OKEN Scanner

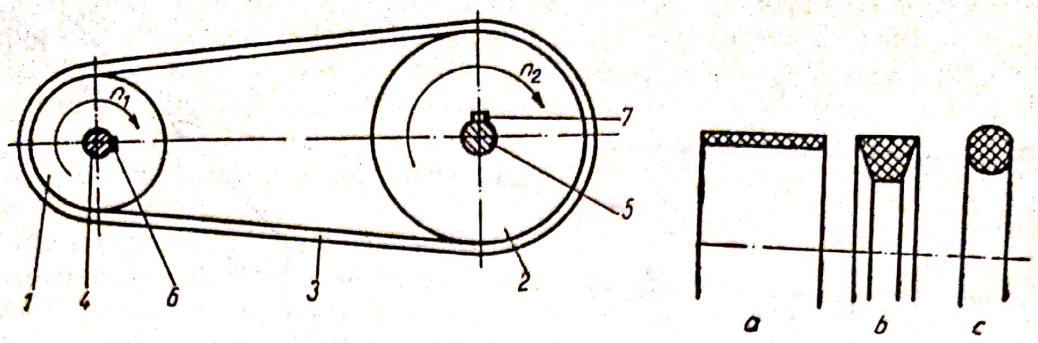


Fig. 42. Schema transmisiei prin curele.

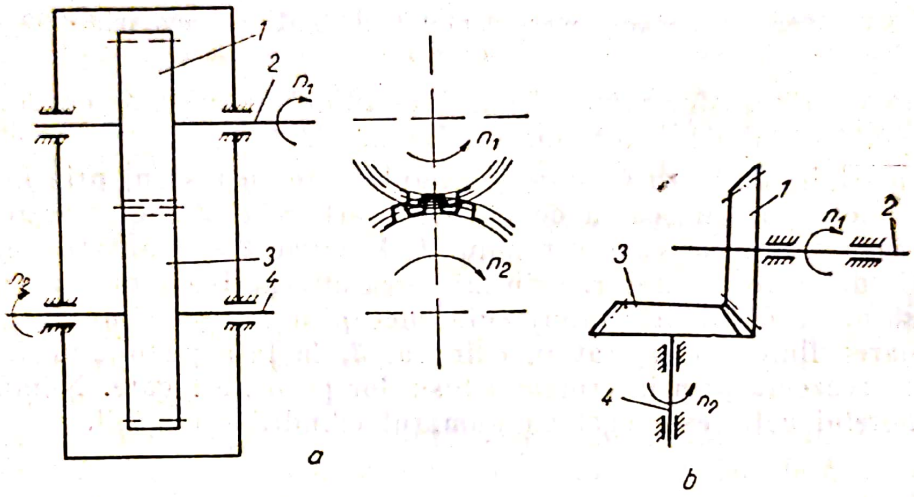


Fig. 43. Schema angrenajului cu roți dințate cilindrice (*a*) și conice (*b*).

încrucișate. De exemplu, de la roata dințată *1*, de pe arborele *2*, mișcarea se transmite la roata dințată *3* de pe arborele *4* (fig. 43, *a*); cei doi arbori sînt paraleli. Sau, de la roata dințată conică *1* de pe arborele *2*, mișcarea se transmite la roata dințată conică *3*, de pe arborele *4* (fig. 43, *b*) cei doi arbori sînt perpendiculari unul pe celălalt.

Transmisiile prin lanț se aseamănă cu transmisiile cu curele. Elementul flexibil care transmite mișcarea este însă în acest caz lanțul, format din zale cu articulații.

i. Organele mecanismului bielă-manivelă

La mașinile de forță (motoare cu ardere internă) mecanismul bielă-manivelă transformă mișcarea liniară alternativă a pistonului *1* în mișcare de rotație a arborilor *2* (fig. 44). Presiunea exercitată de mediul din cilindrul *3*, deplasează pistonul *1* liniar, odată cu tija pistonului *4*. Capul de cruce *5* se deplasează odată cu tija *4*, între glisierele *6*. În capul de cruce este articulat un capăt al bielei *7* prin intermediul unui bolț *6*. Celălalt capăt al bielei 7 este solidar cu fusul *9* cuprins între manivelele *10* ale arborilor cotit *2*. Manivelele *10* se rotesc în jurul axei geometrice a arborelui *2*. Elementele

Scanned with OKEN Scanner

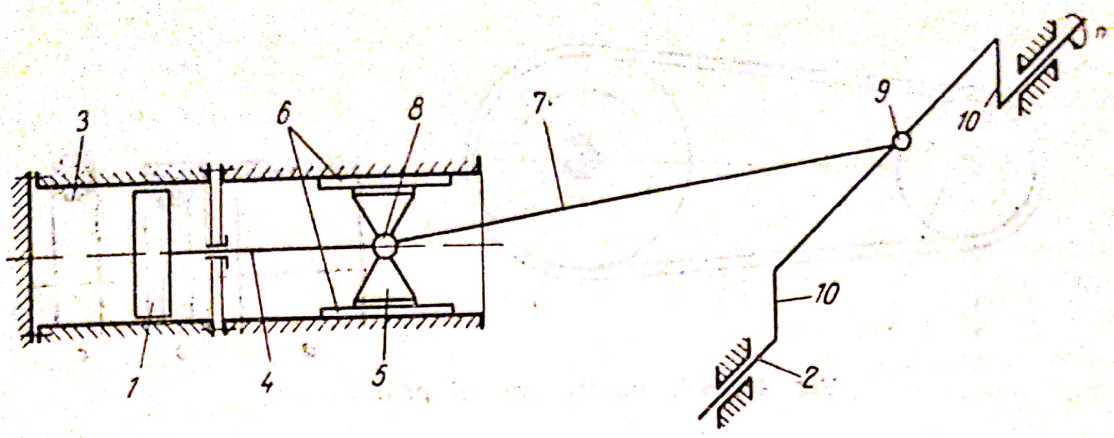


Fig. 44. Schema mecanismului cu bielă și manivelă.

care realizează transformarea mișcării rectilinii în mișcare de rotație (sau invers) sînt: capul de cruce, biela și manivela.

La mașinile de lucru (pompe și compresoare cu piston) prin intermediul aceluiași mecanism, mișcarea de rotație a arborelui *2* este transformată în mișcare liniară alternativă a pistonului *1*. Arborele *2* este antrenat în mișcare de rotație de către un motor. Prin mișcarea alternativă a pistonului, energia transmisă de la motor prin intermediul mecanismului bielă-manivelă produce comprimarea fluidului aspirat în cilindrul *3*, în fața pistonului *1*. Arborele cotit *2* se reazemă prin intermediul fusurilor pe niște lagăre. Numărul coturilor arborelui cotit este egal cu numărul cilindrilor mașinii.

j. Ungerea și întreținerea organelor de mașini

Ungerea cu ulei sau cu unsoare consistentă are drept scop micșorarea frecării dintre suprafețele aflate în contact și ca o consecință micșorarea uzării acestora. Se folosesc dispozitive de ungere locală sau centralizată.

Ungerea cu unsoare consistentă a suprafețelor aflate în mișcare relativă se folosește la mașini care funcționează la turații mici, la rulmenți, la unele angrenaje, la lagărele mașinilor care funcționează în atmosferă cu praf. Ungerea se face cu ajutorul ungătoarelor cu bilă (fig. 45, *a*) sau cu pîlnie (fig. 45, *b*).

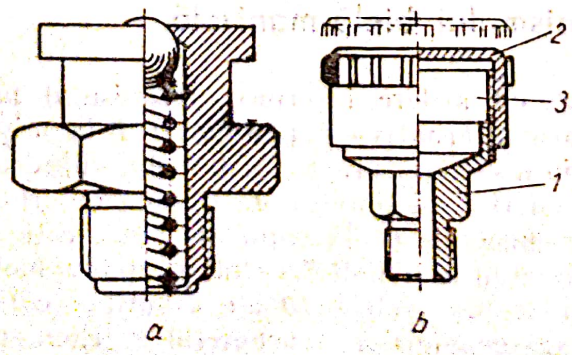


Fig. 45. Tipuri de ungătoare:
a — cu bilă; *b* — cu pîlnie.

La ungătorul cu pîlnie, corpul *1* şi capacul *2*, se umplu cu unsoare consistentă. Prin intermediul filetului *3*, corpul se înşurubează la locul de ungere. Prin înşurubarea capacului, lubrifiantul este forţat să pătrundă prin orificiul din corpul lagărului pînă la fus. Acest ungător este eficace numai dacă se răsuceşte capacul la timp.

Ungerea centrală se realizează prin alimentarea simultană a mai multor puncte cu unsoare. Aceasta este presată dintr-un cilindru al cărui piston este acţionat manual sau mecanic.

Ungerea locală cu ulei se face cu ajutorul unor dispozitive de ungere de construcţie diferită. Se disting dispozitive de ungere fără exces de ulei (ungătoare cu fitil, ungătoare cu ungere prin picurare prevăzute şi cu ac de reglare a cantităţii de ulei) şi dispozitive de ungere în exces (ungere cu inel, cu lănţişor, prin barbotaj).

La ungerea cu inel (v. fig. 40, *a*) inelul de ungere *4* se sprijină pe partea superioară a fusului *1* al arborelui. Cuzinetul *2* este decupat în partea superioară. Partea inferioară a inelului atîrnă în baia de ulei din corpul lagărului *1*. Ungerea are loc numai cînd se roteşte arborele; fusul *3* antrenează inelul *4*, prin frecare: în acest mod uleiul preluat prin aderenţă de partea inferioară a inelului ajunge pe fus şi se răspîndeşte de-a lungul fusului prin nişte canale (buzunare) executate în marginile cuzinetului.

Ungerea prin azvîrlire sau barbotare se realizează cu ajutorul unui disc, inel etc., fixat pe arbore care pătrunde în baia de ulei şi antrenează şi apoi împroaşcă uleiul în interiorul carcasei maşinii sau lagărului. Uleiul se prelinge pe pereţii carcasei, de unde — prin canale colectoare — este condus la locurile de ungere.

Asigurarea unei ungeri corespunzătoare a organelor de maşini, precum şi înlocuirea la timp a pieselor uzate reprezintă condiţiile de bază ale unei funcţionări corecte a maşinilor şi a evitării avariilor.

Prin întreţinerea şi exploatarea maşinilor trebuie să se urmărească micşorarea uzurii prin: asigurarea ungerii (ungere suficientă şi cu lubrifiant de calitate corespunzătoare), protecţia suprafeţelor (prin asigurarea etanşării) împotriva efectului particulelor abrazive şi a mediului corosiv exterior şi prin exploatarea corectă a maşinii.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul III

OPERAȚII MECANICE

1. MĂRUNȚIREA MATERIALELOR SOLIDE

Prin mărunțirea materialelor (sfărîmare sau măcinare) se înțelege reducerea dimensiunilor materialelor solide (bulgări, granule) prin divizarea acestora, ca efect al acțiunii forțelor mecanice. În urma mărunțirii are loc o micșorare a volumului particulelor solide, însoțită de o creștere considerabilă (în special la mărunțirea fină) a suprafeței specifice a acestora.

Produsul obținut în urma mărunțirii este în general un amestec eterogen constituit din particule de forme și dimensiuni diferite. De cele mai multe ori, materialului mărunțit i se impun anumite condiții de formă sau de distribuție a particulelor în amestecul polidispers.

a. Considerații teoretice cu privire la mărunțirea materialelor solide

Un amestec eterogen poate fi definit prin indicarea limitei minime și maxime a dimensiunilor particulelor (metodă aproximativă și incompletă) sau cu ajutorul unor mărimi numerice medii, care se referă la diametrul particulelor, la suprafața specifică, la forma și la distribuția lor pe dimensiuni sau în amestec.

Suprafața specifică σ reprezintă raportul dintre aria totală a particulelor considerate și volumul ocupat de ele (nu volumul propriu) sau masa lor (m^2/m^3, respectiv m^2/kg).

Factorul de formă ψ, sau sfericitatea se definește, ca raportul dintre aria suprafeței unei sfere avînd volumul egal cu volumul granulei și suprafața granulei considerate.

Diametrele medii se raportează la volumul mediu al granulelor (d_v) sau la suprafața granulelor (d_s).

1) Analiză granulometrică și curbe granulometrice

Determinarea dimensiunilor particulelor unui amestec eterogen și a repartizării diferitelor mărimi de particule în amestec se realizează cu ajutorul analizei granulometrice. Repartizarea particulelor pe fracțiuni granulometrice se exprimă în procente din masa totală a amestecului.

Scanned with OKEN Scanner

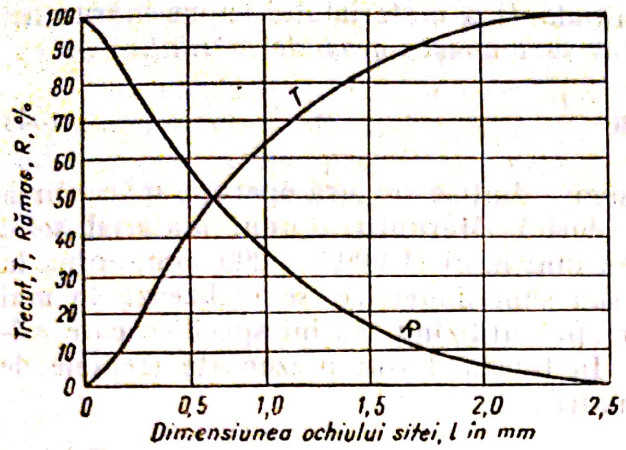


Fig. 46. Curba integrală (cumulativă) pentru analiza granulometrică.

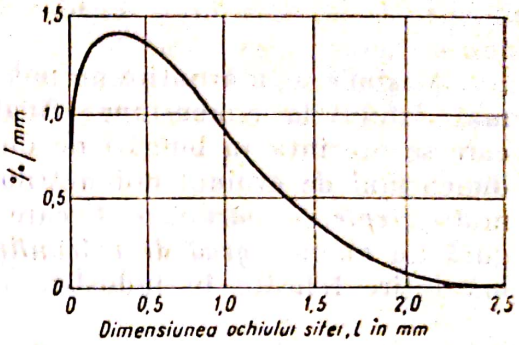


Fig. 47. Curba diferențială pentru curba granulometrică.

Pentru efectuarea analizelor granulometrice se folosesc serii de site standardizate, STAS 1077—50, numite site normale.

În mod convențional, se numesc *site* țesăturile având latura ochiului mai mică de 1 mm și *ciururi*, cele cu latura peste 1 mm.

Pentru analiza granulometrică se trece succesiv materialul printr-o serie de site. Se obțin astfel fracțiuni granulometrice cu dimensiunile particulelor cuprinse între două valori corespunzătoare dimensiunilor a două site consecutive, pe care a avut loc separarea; masa diferitelor fracțiuni obținute se determină prin cîntărire. Cu datele obținute se construiesc curbe granulometrice (fig. 46 și 47). În diagrama din figura 46 s-a reprezentat cumulativ sau integral materialul trecut prin site T, respectiv refuzul sitei (rămas pe sită) R, funcție de dimensiunea ochiului sitei. Un punct oarecare de pe curba T sau R reprezintă procentul de material trecut, respectiv rămas, pe o sită cu dimensiunea corespunzătoare abscisei punctului considerat. În diagrama din figura 47 s-a reprezentat diferențiala curbei din figura 46, adică ordonata reprezintă cantitatea de material, în procente, cu mărimea cuprinsă între două site consecutive, raportată la intervalul de dimensiuni, în mm. Curba diferențială indică gradul de uniformitate al produsului respectiv, și anume, cea aplatizată indică un produs uniform, iar cea cu maxime foarte pronunțate, un produs neuniform.

2) Trepte de mărunțire

Pentru mărunțirea unui solid este necesar ca asupra sa să acționeze o forță mecanică de o anumită intensitate, care să depășească o valoare limită caracterist că fiecărui material în parte.

După modul de acționare a forțelor, mărunțirea se poate realiza prin comprimare, lovire, frecare și forfecare (despicare). Alegerea celei mai potrivite modalități de mărunțire se face în funcție de proprietățile fizico-mecanice ale materialului: mărunțirea prin comprimare și lovire, pentru materiale dure, iar prin frecare, pentru cele mai moi, în plus, comprimarea intervine mai ales la mărunțirea primară (concasare), iar frecarea la mărunțirea fină.

Scanned with OKEN Scanner

Raportul dintre dimensiunea inițială D a materialului supus mărunțirii și dimensiunea finală d a produsului se numește *grad de mărunțire* n:

$$n = \frac{D}{d} \qquad (54)$$

Mașinile de mărunțire nu pot asigura dintr-o singură operație mărunțirea materialului la dimensiunea finală dorită. Mărunțirea unui material solid care se prezintă în bulgări de dimensiuni mari (1 000 . . . 200 mm), pînă la dimensiuni de ordinul milimetrilor sau submilimetrice, se realizează în mai multe *trepte de mărunțire*, fiecare treaptă utilizînd mașini specifice care asigură un anumit *grad de mărunțire*. În tabela 2 sînt prezentate treptele de mărunțire folosite în industria chimică.

Tabela 2

Trepte de mărunțire

Denumirea treptei de mărunțire	Dimensiunea particulelor		Gradul de mărunțire n
	Inițială mm	Finală mm	
Concasare	1 500—150	500 —25	3— 4
Granulare	125— 6	25 — 1	5— 6
Măcinare	5— 0,15	0,5— 0,001	10—15

Pentru materialele moi se folosește și termenul de dezintegrare, care corespunde treptelor de granulare (transformare în granule) și măcinare.

Procedee de mărunțire. Operația de mărunțire a materialelor solide se poate realiza prin procedee discontinue sau continue (fig. 48); cele mai răspîndite sînt procedeele continue.

În *procedeele discontinue*, materialul inițial este încărcat în mașina de mărunțit, și apoi este supus operației de mărunțire, pînă ajunge la dimensiunea finală dorită.

Procedeele continue pot fi realizate în circuit deschis sau circuit închis. În procedeele continue în circuit deschis materialul parcurge o singură dată

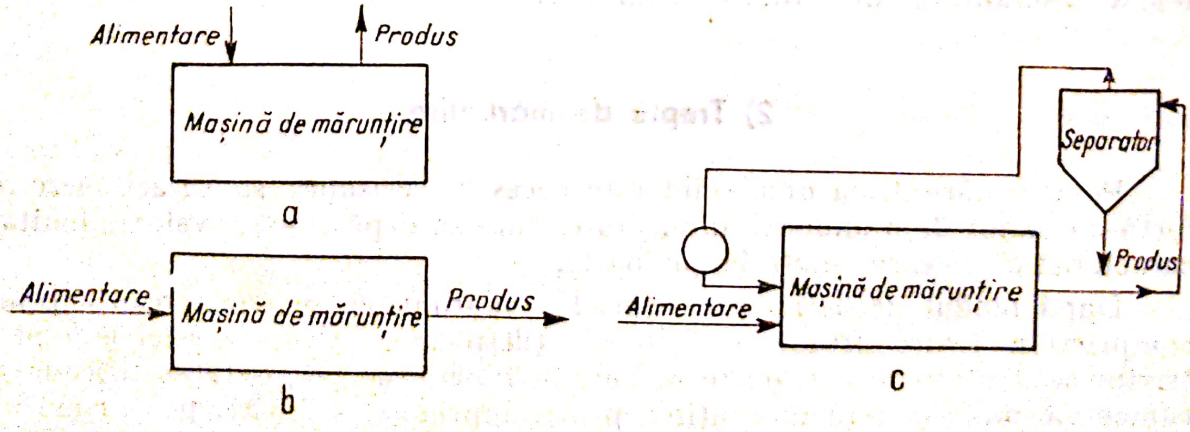


Fig. 48. Procedee de mărunțire:
a — discontinuu; *b* — continuu în circuit deschis; *c* — continuu în circuit închis.

Scanned with OKEN Scanner

mașina sau instalația de mărunțire, reducîndu-și continuu dimensiunile; se obține un produs neuniform din punct de vedere granulometric.

Procedeele continue în circuit închis urmăresc obținerea unui produs cu granulometrie cît mai uniformă, în condițiile unui consum de energie cît mai mic. Aceste procedee se realizează prin introducerea în circuit a unui separator care permite evacuarea din circuitul de mărunțire numai a materialului care a atins dimensiunea dorită. Materialul cu dimensiuni mai mari este reintrodus în circuitul de mărunțire.

b. Utilaje de mărunțire

După gradul de mărunțire pe care îl pot realiza (treptele de mărunțire), utilajele de mărunțire se împart în: **concasoare, granulatoare, dezintegratoare** și **mori.** În interiorul acestor categorii mari pot fi întîlnite diferite tipuri care diferă între ele, atît din punct de vedere al construcției cît și al principiilor de funcționare.

1) Concasoare și granulatoare

Concasoarele servesc la mărunțirea primară sau grobă (de la dimensiunea inițială a bulgărilor de 1 000 . . . 200 mm), iar granulatoarele la mărunțirea intermediară, adică la obținerea unor granule cu ordinul de mărime al milimetrilor. Din punctul de vedere al construcției și al principiilor de funcționare, aceste utilaje de mărunțire se împart în mai multe categorii, dintre care mai importante pentru industria chimică sînt următoarele: concasoare și granulatoare cu fălci, giratorii și cu ciocane.

Concasoare și granulatoare cu fălci. În aceste utilaje mărunțirea are loc între două piese puternice — fălcile concasorului — datorită mișcărilor alternative executate de una sau ambele fălci, în urma cărora materialul solid este sfărîmat prin comprimare și despicare.

Concasoarele cu fălci se întrebuințează pentru sfărîmarea materialelor dure, de dimensiuni mari, care necesită o mărunțire primară sau intermediară.

Concasorul reprezentat în figura 49 are o falcă fixă *2* și o falcă mobilă *1*, care execută mișcări de oscilație în jurul unui ax orizontal *6*, situat lîngă gura de încărcare. Cele două fălci, *1* și *2*, sînt acoperite cu plăci din oțel dur, *4* (conținînd 12—14% mangan), rezistente la uzură, care se pot înlocui ușor. Lateral, spațiul de mărunțire este limitat de alte două plăci rezistente, fixe, *3*. Mașina este alimentată cu material prin partea superioară.

Mișcarea de oscilație a fălcii mobile este realizată cu ajutorul unei biele *8*, care transmite mișcarea de la axul motor *7*, prevăzut cu un excentric, prin intermediul a două bare sau plăci de presiune *9*, care realizează o articulație între bielă, falca mobilă și piesa de sprijin *5*, articulație menținută solidar printr-o tijă de rapel 10, cu arc *11*.

La acest tip de concasoare cu fălci, deschiderea gurii de alimentare cu material este fixă iar deschiderea de evacuare a produsului se poate regla cu ajutorul unor pene.

Scanned with OKEN Scanner

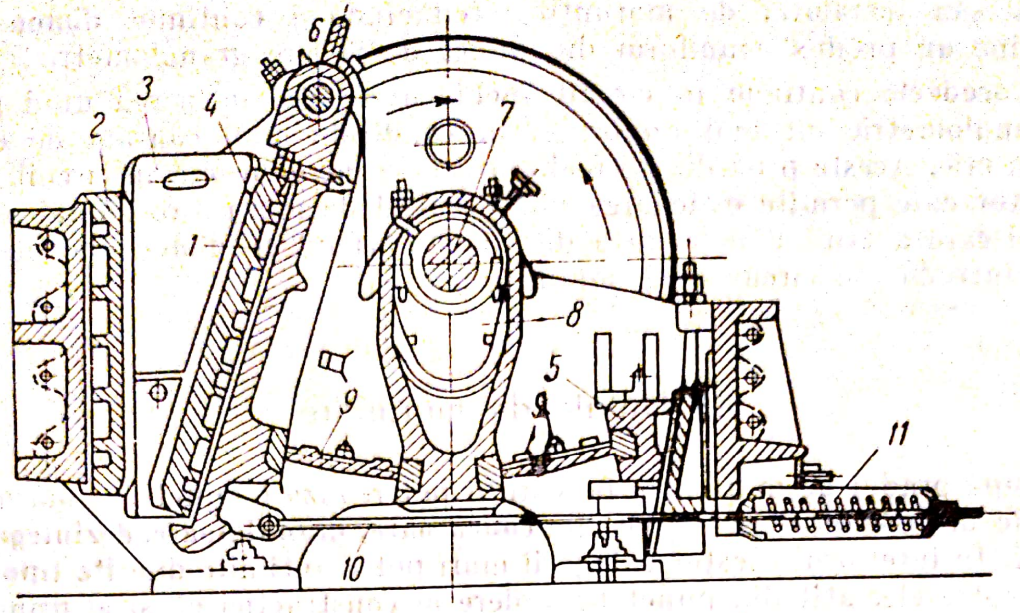


Fig. 49. Concasor cu falcă mobilă.

Concasoarele cu fălci prezintă o serie de avantaje: simplitate şi robusteţe a construcţiei, deservire uşoară, domeniu larg de utilizare. Ca dezavantaje se enumeră: acţionează periodic asupra materialului şi se pun în mişcare mase mari neechilibrate, din care cauză necesită fundaţii solide, independente de fundaţiile clădirii şi volanturi masive.

Granulatoarele cu fălci au acelaşi principiu de funcţionare ca şi concasoarele respective, cu deosebirea că, în general, sînt utilaje mai mici. Unul dintre cele mai răspîndite tipuri de granulatoare cu fălci este granulatorul cu fălci fără bielă (fig. 50). La acesta, axul motor, prevăzut cu excentric, serveşte şi ca ax de oscilaţie a fălcii mobile. Datorită acestui mod de acţionare, fiecare punct al fălcii descrie şi el o rotaţie; punctele din partea superioară descriu o rotaţie aproape circulară, iar cele din partea inferioară curbe eliptice, din ce în ce mai turtite. Aceste mişcări ale fălcii contribuie la evacuarea mai uşoară a produsului mărunţit.

Concasoare şi granulatoare giratorii. *Concasoarele giratorii* (fig. 51) pot fi considerate ca provenind din cele cu fălci, la care însă suprafeţele de mărunţire au formă circulară, iar acţiunea de comprimare a fălcii mobile nu mai este intermitentă ci continuă. Acţiunea de sfărîmare a materialului solid are loc datorită deplasării unui trunchi de con (suprafaţa mobilă *2*) în interiorul unei camere de mărunţire, de asemenea, de formă tronconică (suprafaţa fixă *1*). Ambele suprafeţe de mărunţire sînt căptuşite cu plăci crestate, din oţel dur, rezistent la uzură. Trunchiul de con este fixat pe arborele principal *3*, suspendat într-un lagăr *4*, care îi permite să oscileze şi să se rotească în toate direcţiile. Partea inferioară a axului principal pătrunde liber într-o bucşă cu alezaj excentric *5*, care se mişcă într-un lagăr vertical *6*;

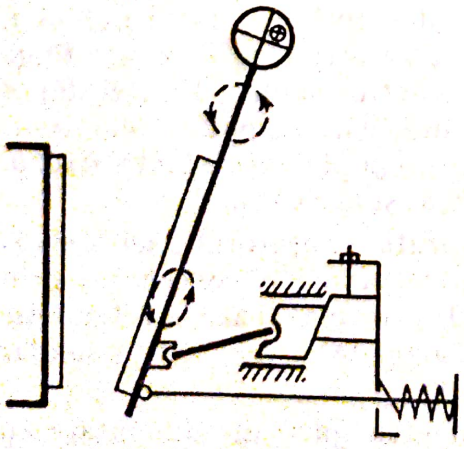


Fig. 50. Schema de principiu a granulatorului cu fălci.

Scanned with OKEN Scanner

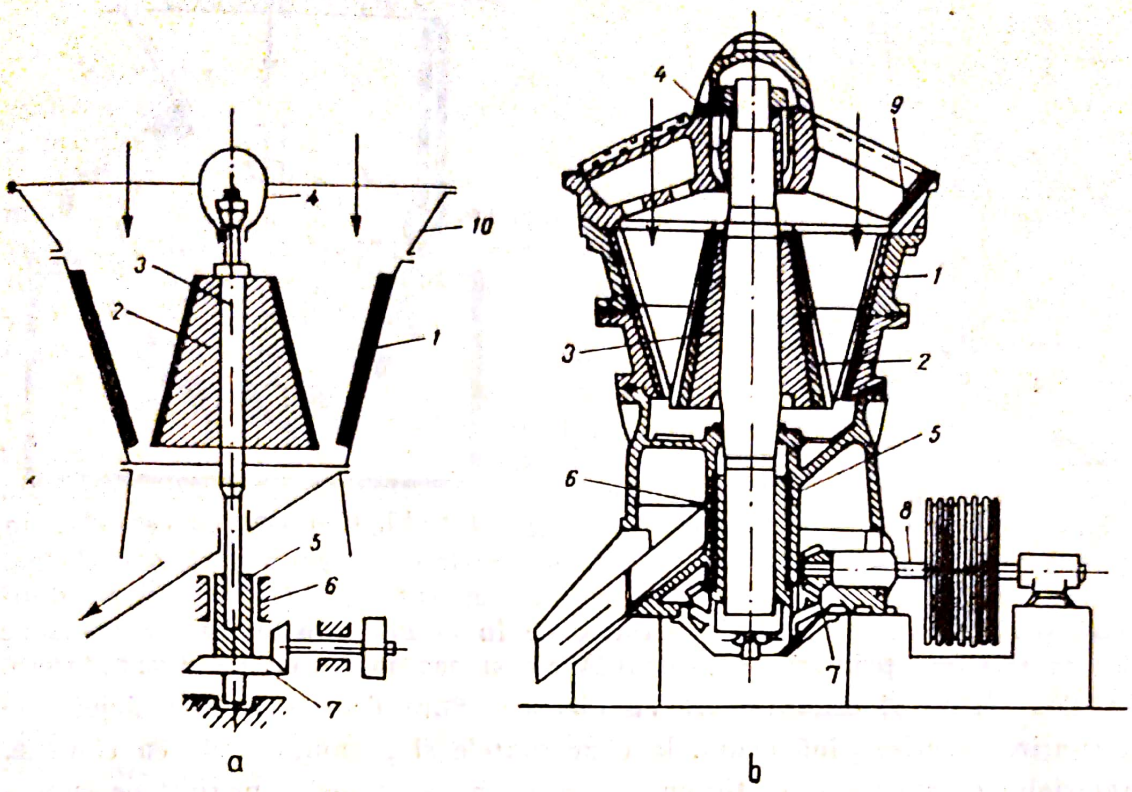


Fig. 51. Concasor giratoriu cu ax suspendat.

bucşa *5* este în legătură cu arborele motor *8*, printr-un angrenaj conic *7*. Axul principal *5*, în mişcarea sa, descrie un con cu vîrful în lagărul superior de susţinere; o astfel de mişcare se numeşte *mişcare giratorie*.

Materialul de sfărîmat se introduce prin pîlnia concasorului *9*, pătrunde în spaţiul de mărunţire şi se sfărîmă datorită acţiunii de comprimare şi frecare de către trunchiul de con în punctele în care acesta se apropie de peretele camerei; în partea diametral opusă, trunchiul de con se găseşte la distanţa maximă de peretele camerei de sfărîmare şi are loc evacuarea materialului concasat. Datorită construcţiei şi principiului de funcţionare, aceste concasoare au un grad de sfărîmare mai mare (4—5), iar produsul obţinut este mai uniform şi conţine mai puţin mărunt.

Granulatoarele giratorii se deosebesc de concasoarele respective prin unele particularităţi de construcţie. Astfel, ambele suprafeţe de sfărîmare sînt înclinate în acelaşi sens (nu în sens contrar ca la concasoare), iar conul de sfărîmare este mai scurt şi are un diametru mai mare la bază.

Mai răspîndite în industria chimică sînt granulatoarele Symons construite fie cu ax orizontal fie cu ax vertical. Acestea au suprafeţele de mărunţire înclinate în acelaşi sens, devenind aproape paralele; de asemenea, turaţia este mult mai mare, 500—700 rot/min. faţă de 75—200 rot/min. la concasoarele giratorii. O altă deosebire faţă de concasoarele giratorii descrise constă în aceea că axul principal nu este suspendat în partea superioară, ci se sprijină numai la partea inferioară în bucşa excentrică.

O construcţie interesantă o prezintă concasorul giratoriu cu două trepte (fig. 52), la care atît conul de sfărîmare cît şi camera sînt împărţite în două

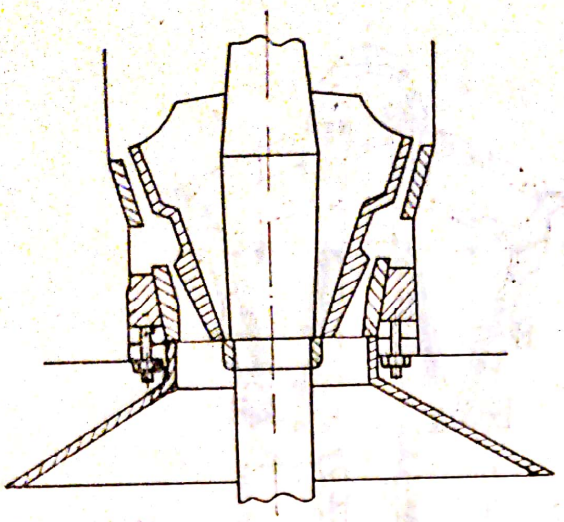


Fig. 52. Concasor giratoriu în două trepte.

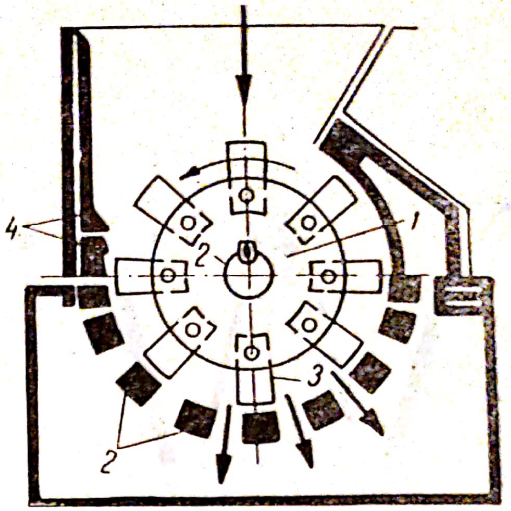


Fig. 53. Concasor cu ciocane.

jumătăţi. Această construcţie permite ca în aceeaşi maşină să se realizeze atît mărunţirea primară (concasarea) cît şi cea intermediară (granularea).

Concasoare şi granulatoare cu ciocane. Spre deosebire de utilajele de mărunţire descrise pînă acum, la concasoarele şi granulatoarele cu ciocane, materialul de sfărîmat, în timpul operaţiei, nu se găseşte sprijinit pe suprafeţele de mărunţire (fălci, cilindri) ci suspendat în spaţiul de mărunţire.

Concasorul cu ciocane (fig. 53) este format dintr-o carcasă căptuşită cu plăci striate de oţel dur *4*, în care se roteşte cu viteză mare (500—1 800 rot/min) un rotor *1*, format din mai multe discuri distanţate, între care sînt articulate bare dreptunghiulare numite ciocane, *3*; ciocanele se mişcă liber, din care cauză, în timpul funcţionării ia o poziţie radială datorită forţei centrifuge.

Materialul introdus prin partea superioară, pătrunde în spaţiul de mărunţire, unde, prin lovire şi aruncare repetată, ajunge la dimensiunea dorită şi trece prin grătarul *2*, aşezat în partea inferioară a carcasei.

Utilajele din această categorie se folosesc pentru sfărîmarea materialelor cu duritate medie (sare, marmură, calcar, ghips), a căror umiditate trebuie să nu depăşească 10—15% pentru a nu înfunda grătarul. Concasoarele cu ciocane au gradul de mărunţire $n=10—15$, iar cele cu două rotoare ating chiar $n=30—40$, dimensiunea finală a produsului ajungînd la 30—40 mm şi uneori chiar la 10—15 mm. Pentru sfărîmarea materialelor moi sau lipicioase, ciocanele se montează fix pe rotor, mărind astfel acţiunea de mărunţire prin frecare şi despicare.

Granulatoarele cu ciocane au construcţia şi funcţionarea asemănătoare cu cea a concasoarelor descrise. Se utilizează pentru mărunţirea materialelor casante sau fibroase (cărbuni, asfalt, îngrăşăminte chimice, coajă de lemn, oase) şi în construcţii speciale pentru materiale moi (smoală, plută etc.)

Scanned with OKEN Scanner

2) Dezintegratoare şi mori

Mărunţirea fină sau măcinarea se realizează cu ajutorul dezintegratoarelor şi morilor.

Dezintegratoarele sînt utilaje în care materialul solid se mărunţeşte prin lovire şi forfecare, datorită acţiunii unor tije metalice fixate pe două discuri care se rotesc în sensuri opuse (fig. 54), cu turaţie foarte mare, peste 1 000 rot/min.

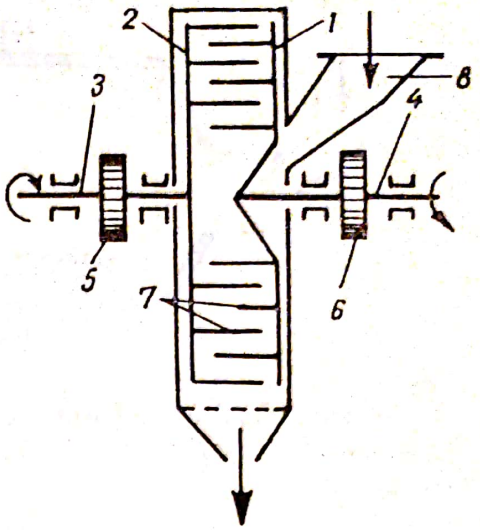


Fig. 54. Schema unui dezintegrator:

1, 2 — discuri; *3, 4* — arbori; *5, 6* — roţi de transmisie prin curea; *7* — tije din oţel dur; *8* — pilnie de alimentare.

Materialul de mărunţit, format din bulgări de 10 . . . 20 mm, pătrunde prin pîlnia de alimentare 8 în spaţiul de mărunţire dintre tijele metalice 7, fixate pe cele două discuri *1* şi *2*. Aceste tije sînt fixate în cercuri concentrice, astfel încît tijele fixate pe un disc pătrund şi se rotesc între tijele celuilalt disc. Distanţa dintre tije scade de la cercurile centrale către cele periferice. Datorită aşezării tijelor, materialul solid este mărunţit succesiv, astfel încît după ultimul rînd de tije materialul atinge dimensiunea dorită; pentru a nu se avaria maşina, este necesar să se evite pătrunderea unor materiale prea dure în spaţiul de mărunţire.

Dezintegratoarele se utilizează pentru mărunţirea materialelor moi şi semidure sau casante (cărbuni, sare, coloranţi, pirită), precum şi a materialelor fibroase cu umiditate pînă la 10%.

Mori cu bile. Sub această denumire generală sînt cuprinse morile în care corpurile de mărunţire — bile (sfere), sfere găurite, cuburi, inele cu secţiunea pătrată, cilindrică, bastoane, bare etc. — se mişcă liber, împreună cu materialul de măcinat, într-un tambur (cilindru) rotativ. Folosite într-o mare varietate de tipuri constructive, morile cu bile sînt cele mai răspîndite maşini de măcinare din industria chimică.

Acţiunea de măcinare a morilor cu bile se realizează prin lovirea şi frecarea materialului de către corpurile de măcinare, antrenate în mişcarea de rotaţie a tamburului, datorită forţei centrifuge. Funcţie de turaţia tamburului, ca urmare a forţei centrifuge ce se manifestă în fiecare bilă (corp de măcinare), aceasta se ridică pînă la un anumit nivel, apoi alunecă sau cade, descriind o curbă parabolică. Dacă turaţia creşte, bilele sînt antrenate pînă la înălţimi din ce în ce mai mari, iar cînd aceasta atinge o anumită valoare critică, la care forţa centrifugă este suficient de mare, bilele se rotesc odată cu moara, acţiunea de măcinare încetînd. Din aceste consideraţii rezultă că există o turaţie optimă a tamburului, astfel încît bilele să cadă de la o înălţime care să asigure acţiunea de măcinare.

Scanned with OKEN Scanner

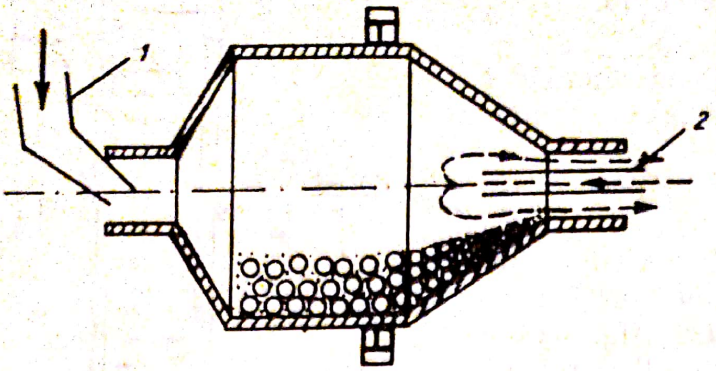


Fig. 55. Moară conică cu bile:
1 — alimentarea cu material; *2* — conductă de aer pentru clasarea materialului mărunțit.

Se consideră că acțiunea de măcinare este optimă cînd bila se desprinde de suprafața interioară a tamburului într-un punct care corespunde turației optime:

$$n_0 = \frac{32}{\sqrt{D}}, \qquad (55)$$

D fiind diametrul tamburului, în m.

Se observă că turația nu depinde de diametrul și masa bilei.

Morile cu bile se umplu cu corpuri de măcinat pînă la 40—45% din volumul total al morii; diametrul bilelor depinde de dimensiunile inițiale și finale ale materialului.

Dintre diferitele tipuri constructive de mori, cele mai importante sînt: morile cilindrice, morile compartimentate și morile conice (fig. 55).

Morile cilindrice sau *tubulare* sînt formate dintr-un tambur orizontal, sprijinit prin două gîturi în lagăre de susținere și acționate cu ajutorul unei coroane dințate. Alimentarea și evacuarea materialului se face continuu prin cele două gîturi ale tamburului. Drept corpuri de măcinare se utilizează cilindri sau bare.

Morile compartimentate constau dintr-un tambur cilindric orizontal lung, separat, prin pereți transversali perforați, în mai multe compartimente; fiecare compartiment acționează ca o moară de-sine-stătătoare. Primul compartiment, în sensul fluxului de măcinare, este umplut cu bile și macină în special prin lovire; compartimentele următoare asigură mărunțirea din ce în ce mai fină, fiind încărcate fie cu bile de diametru mai mic, fie cu cilindri de oțel.

Morile cu bile prezintă o serie de avantaje față de celelalte mașini de măcinare, avantaje rezultate din funcționarea sigură, adaptarea ușoară la diferite condiții de lucru, mișcarea liberă a corpurilor de măcinare etc. Morile cu bile lucrează cu un grad de mărunțire $n=50-100$ și au un randament bun.

Verificarea cunoștințelor

1. Ce se înțelege prin analiză granulometrică?
2. Enumerați factorii mai importanți care influențează operația de mărunțire a materialelor solide.
3. Comparați din punct de vedere constructiv și funcțional concasoarele cu fălci și concasoarele giratorii.
4. Ce sînt granulatoarele? Dați cîteva exemple.
5. Definiți, din punct de vedere constructiv și funcțional, morile cu bile.

Scanned with OKEN Scanner

2. CLASAREA MATERIALELOR SOLIDE

Operaţia de separare a amestecurilor granulare sau pulverulente polidisperse în fracţiuni sau clase granulometrice se numeşte *clasare.*

Clasarea pe fracţiuni granulometrice se realizează prin: *cernere* pe site şi *separare pneumatică.*

a. Cernerea

Operaţia de cernere sau ciuruire se aplică la fracţionarea amestecurilor polidisperse cu granule mari, de la 1—2 mm pînă la 400—500 mm. Clasarea prin cernere se realizează prin separarea fracţiunilor respective pe suprafeţe speciale de cernere, prevăzute cu deschideri (ochiuri) de forme şi mărimi corespunzătoare. Materialul care trebuie supus cernerii este adus pe suprafaţa de separare şi făcut să circule de-a lungul acesteia, obţinîndu-se astfel două fracţiuni granulometrice: *cernutul* (*trecut*) şi *refuzul* (*rămas*).

Aparatele de separare utilizate pentru realizarea cernerii se numesc *site, ciururi* şi *grătare.* Acestea se caracterizează prin dimensiunile şi forma deschiderilor (ochiurilor), prin desimea lor (numărul de ochiuri pe unitatea de suprafaţă sau de lungime) şi prin suprafaţa activă sau utilă de cernere (suprafaţa deschiderilor).

Randamentul cernerii *se defineşte ca raportul dintre masa cernutului şi masa granulelor din amestecul iniţial cu dimensiunile mai mici decît latura deschiderilor suprafeţei de cernere.*

Utilaje de cernut

Dintre utilajele de cernut utilizate în separările industriale se menţionează: ciururile rotative, oscilante şi vibrante.

Ciururile rotative constau dintr-una sau mai multe suprafeţe de cernere, din tablă perforată sau din împletitură de sîrmă, dispuse concentric, în formă de tambur, cu secţiuni cilindrice sau poligonale. Suprafeţele de cernere sînt

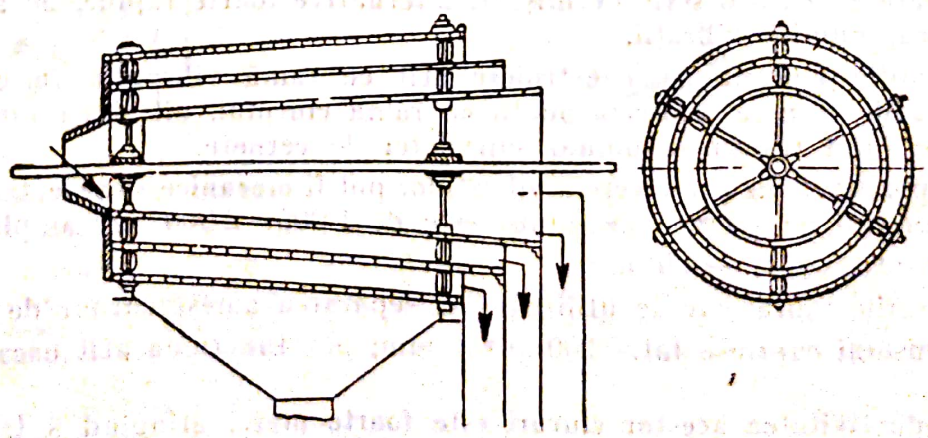


Fig. 56. Ciur rotativ tronconic cu axă orizontală.

Scanned with OKEN Scanner

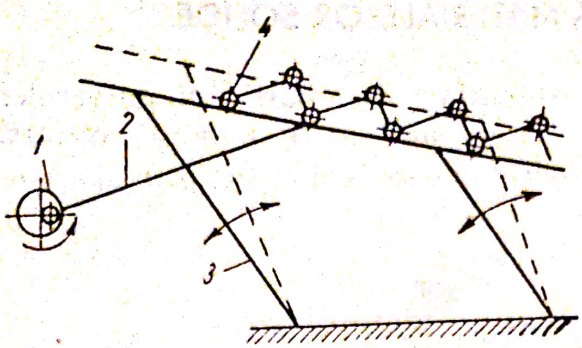


Fig. 57. Deplasarea materialului pe suprafaţa unui ciur oscilant:
1 — dispozitiv de acţionare cu excentric; *2* — bielă; *3* — picioare elastice; *4* — granulă de material.

întinse pe două sau trei cercuri de oţel fixate prin bare dispuse radial pe un ax sprijinit în lagăre. Ciurul tronconic cu axa orizontală în figura 56 are trei suprafeţe de cernere; latura ochiurilor ciururilor scade din interior către exterior.

Ciururile oscilante sînt suprafeţe de cernere plane, montate în rame; au mişcare oscilantă realizată cu ajutorul unui mecanism corespunzător, de obicei o bielă acţionată de un excentric (fig. 57). Ramele ciururilor sînt sprijinite pe picioare elastice, înclinate la 15° faţă de verticală, care permit oscilarea, sau sînt suspendate la capete, prin intermediul unei tije. Ele oscilează cu 60—400 oscilaţii pe minut, în funcţie de natura materialului, la o amplitudine de la 2 la 100 mm.

Datorită aşezării bielei aproximativ perpendicular pe direcţia picioarelor elastice, ciurul capătă o mişcare oscilantă, şi, datorită înclinării picioarelor, mişcarea ciurului are un caracter ascendent la cursa înainte şi descendent la cursa înapoi. La cursa înainte granulele se deplasează odată cu suprafaţa de cernere. La cursa înapoi suprafaţa de cernere coboară mai repede, astfel încît granulele se desprind de aceasta şi capătă o mişcare aparentă prin salturi faţă de ciur. Această mişcare ajută ca materialul de separat să se repartizeze repede şi uniform pe suprafaţa de cernere, uşurînd totodată, prin salturile granulelor, accesul şi trecerea materialului mărunt prin ochiurile ciurului.

Ciururile oscilante se caracterizează printr-o productivitate mare şi eficacitate de separare înaltă, la o uzură redusă a suprafeţei de cernere.

Ciururile vibrante se deosebesc de cele oscilante prin faptul că suprafaţa de separare execută o serie de mişcări alternative foarte rapide, cu amplitudine mică, numite vibraţii.

Ciururile vibrante se construiesc atît cu ramă vibrantă, în care caz suprafaţa de cernere vibrează odată cu rama ciurului, cît şi cu rama fixă, vibraţiile fiind transmise numai suprafeţei de cernere.

Dispozitivele de producere a vibraţiilor pot fi mecanice sau electromagnetice. Numărul de vibraţii pe minut este de 1 000—2 000, iar amplitudinea unei vibraţii de 1,5—2,5 mm.

Ciururile vibratoare se utilizează la separarea amestecurilor de granule cu dimensiuni cuprinse între 200 şi 0,1 mm; pot funcţiona atît uscat, cît şi umed.

Productivitatea acestor ciururi este foarte mare, atingînd 8 t/h material pe m^2 de suprafaţă de cernere.

Scanned with OKEN Scanner

b. Separarea pneumatică

Separarea pneumatică se utilizează pentru clasarea amestecurilor conținînd, ca fracțiuni principale, pulbere fină și granule mari, greu de separat prin cernere. Utilajele pentru realizarea separării pneumatice funcționează utilizînd fie *efectul forței de gravitație*, fie *efectul forței centrifuge*.

Separatoarele pneumatice cu curent vertical de aer (fig. 58) utilizează efectul gravitației asupra granulelor de diferite dimensiuni (deci și mase diferite), într-un curent de aer care-și micșorează brusc viteza din cauza măririi secțiunii de curgere la intrarea în separator, în spațiul inelar dintre cele două conuri.

Aceste separatoare se montează de obicei deasupra morilor, astfel încît fracțiunea mare va fi returnată în circuitul de măcinare.

Separatorul pneumatic centrifug (fig. 59) este format din două mantale cilindrice coaxiale *1* și *2*, terminate cu o parte conică. Curentul de aer, în circuit închis, este furnizat de către un ventilator *4*, fixat pe același ax cu discul *3* de împrăștiere a materialului pulverulent ce urmează a fi separat.

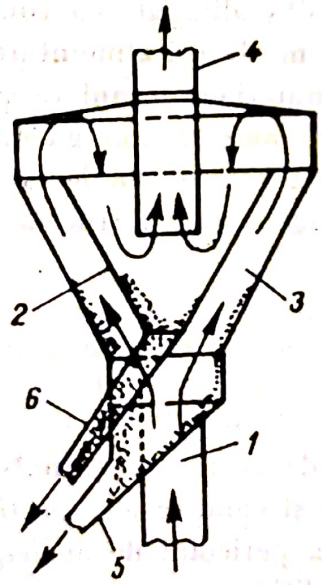


Fig. 58. Separator pneumatic în curent vertical de aer:

1 — intrarea curentului de aer cu materialul de clasat; *2* — con interior; *3* — con exterior; *4* — ieșirea aerului; *5* — evacuarea fracțiunii mari; *6* — evacuarea fracțiunii fine.

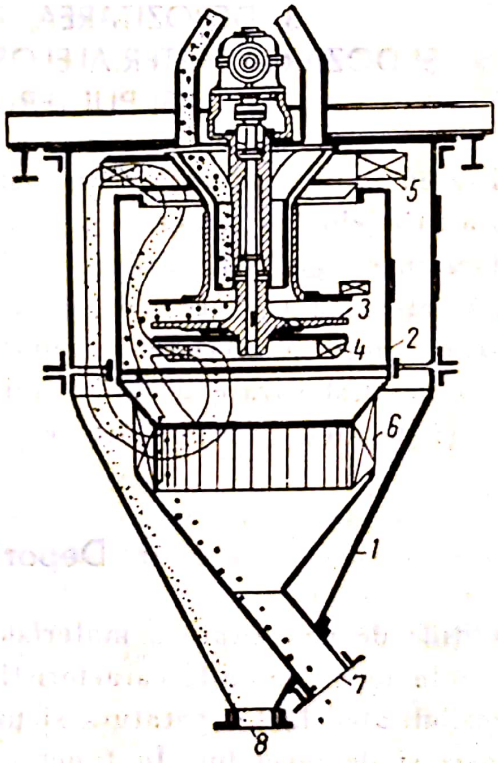


Fig. 59. Separator pneumatic centrifugal:

1 — manta exterioară; *2* — manta interioară; *3* — disc de împrăștiere; *4* — ventilator; *5* — jaluzele superioare; *6* — jaluzele inferioare; *7* — ieșirea fracțiunii mari; *8* — ieșirea fracțiunii fine.

Scanned with OKEN Scanner

Discul de împrăștiere *3*, rotindu-se cu turație mare (600—1 000 rot/min), aruncă, sub influența forței centrifuge, granulele de material către peretele mantalei interioare. Curentul de aer produs de ventilator antrenează în mișcarea sa granulele de dimensiuni mai mici, iar cele grosiere se depun pe perete și se evacuează ca fracțiune mare. Curentul de aer conținînd granulele fine trece în spațiul dintre cele două conuri, unde granulele se depun pe peretele mantalei exterioare sau pe jaluzelele *5*, care intră în conul interior și se evacuează ca fracțiune fină. Separatorul centrifug se caracterizează prin eficiența ridicată și consum redus de energie.

Verificarea cunoștințelor

1. Definiți operația de clasare a materialelor solide granulare prin cernere.
2. Faceți o comparație între utilajele de cernut.
3. Descrieți construcția și funcționarea separatorului pneumatic centrifugal.

3. DEPOZITAREA, TRANSPORTUL ȘI DOZAREA MATERIALELOR SOLIDE, GRANULARE ȘI PULVERULENTE

Realizarea multor procese tehnologice necesită alimentarea continuă și uniformă a utilajelor cu materiale granulare. De multe ori alimentarea utilaje or se face într-o anumită ordine, cu diferite materiale granulare sau după o anumită rețetă în ceea ce privește compoziția amestecului global. Toate aceste aspecte implică necesitatea depozitării materialelor solide în apropierea locului de desfășurare a procesului tehnologic, transportul la utilajele respective și dozarea corespunzătoare.

a. Depozitarea

Condițiile de depozitare a materialelor solide granulare și pulverulente sînt determinate de anumite caracteristici fizice și chimice ale acestora, cum ar fi: sensibilitatea la temperatură și umiditate, pericolul de autoaprindere, de explozie și de incendiu. În funcție de condițiile de depozitare impuse, depozitele pot fi: *depozite descoperite*, *acoperite* (*șoproane*), *închise* (*magazii* și *silozuri sau buncăre*).

Depozitele descoperite se folosesc pentru depozitarea unor cantități mari de materiale insensibile la condițiile atmosferice. Suprafața de depozitare poate fi aturală sau îmbunătățită prin diferite mijloace și prevăzută cu pantă sau cu drenaj pentru scurgerea apelor.

Șoproanele sînt de fapt arii acoperite pentru a proteja materialele de acțiunea directă a soarelui și a ploilor.

Scanned with OKEN Scanner

Magaziile servesc la depozitarea şi păstrarea în condiţii optime a materialelor. Încărcarea şi descărcarea magaziilor cu materiale granulare se realizează prin acoperiş, şi respectiv prin podea, cu mijloace corespunzătoare.

Silozurile sau buncărele reprezintă depozite de capacitate mare, pînă la 100 m^3, în formă de piramidă sau cilindroconică, confecţionate din tablă sau beton (uneori din cărămidă sau lemn). Partea inferioară a silozului, îngustată sub formă de trunchi de con sau piramidă, urmăreşte uşurarea descărcării materialului din siloz. Este necesar ca unghiul de înclinare a pereţilor acestei părţi să fie mai mare decît unghiul de taluz natural al materialului respectiv.

b. Transportul

Se vor avea în vedere numai mijloacele mecanice, care servesc la transportul continuu al materialelor granulare şi pulverulente, în diferite puncte de încărcare din interiorul uzinei sau la alimentarea diferitelor utilaje şi aparate (mori, uscătoare, cuptoare, reactoare etc.).

Transportoarele cu bandă sînt cele mai utilizate utilaje pentru transportul continuu, pe distanţe mici, a materialelor solide granulare sau în bucăţi, pe direcţie orizontală sau cu înclinări pînă la 20—25°. Se folosesc însă şi pentru transportul la distanţe mari (distanţe de ordinul a 10 km) a nisipului şi pietrişului, utilizîndu-se mai multe benzi, cu lungimea de 300—400 m fiecare, în serie.

Un transportor cu bandă (fig. 60) este format dintr-o bandă flexibilă fără sfîrşit *1* (bandă transportoare), înfăşurată pe două tambure *2* şi *3* şi susţinută în lungul ei pe rolele cilindrice purtătoare *4*. Uneori rolele pot fi astfel montate, încît ramura superioară a benzii să nu mai rămînă plană, ci să ia forma unui jgheab (fig. 61). Tamburele şi rolele sînt aşezate pe un schelet metalic construit din oţel profilat. Banda este antrenată de tamburul *2*, acţionat de un motor electric, prin intermediul unui reductor de viteză. Tamburul *3* serveşte la întinderea benzii, pentru a asigura un contact cît mai bun, uşurînd astfel antrenarea. Viteza de deplasare a benzilor transportoare poate fi între 0,5 şi 3 m/s. Benzile transportoare pot fi echipate cu cîntare integratoare şi totalizatoare, care permit verificarea debitului momentan al instalaţiei, putînd atinge debite pînă la 1 000 t/h.

Elevatoarele sînt utilaje cu funcţionare continuă pentru transportul pe verticală al materialelor solide granulare şi pulverulente, în stare uscată

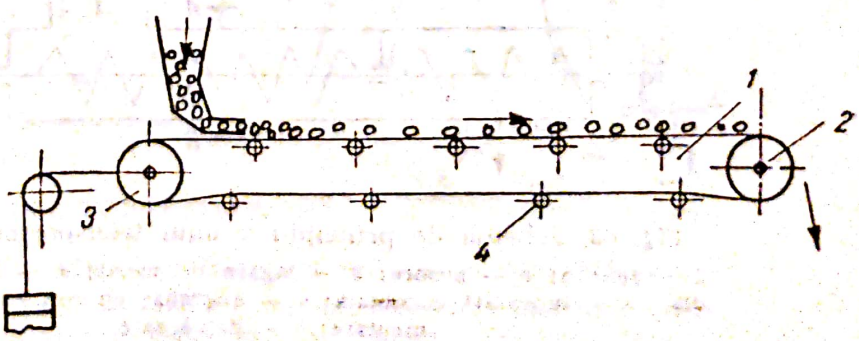


Fig. 60. Schema unui transportor cu bandă.

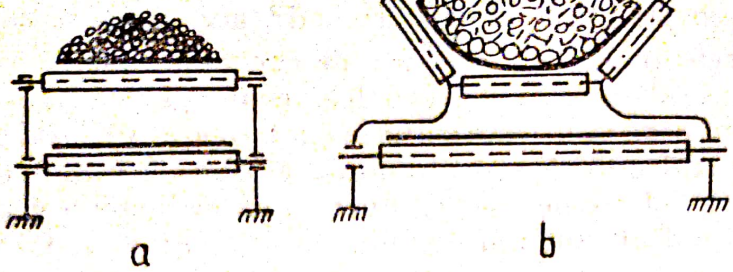


Fig. 61. Secțiune transversală printr-un transportor cu bandă:
a — cu bandă orizontală; *b* — cu bandă în formă de jgheab.

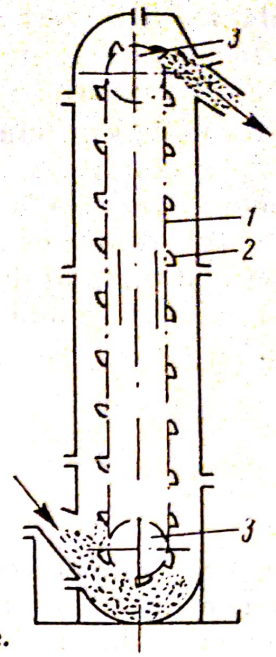


Fig. 62. Elevator cu cupe.

sau umedă. Organul transportor este format fie dintr-o bandă flexibilă fără sfîrșit, fie din unul sau două lanțuri trecute peste două roți *3*, cea din partea superioară servind pentru acționare. Pe banda sau lanțurile fără sfîrșit *1* sînt fixate cupele *2*, în care se încarcă materialul. Roțile sînt montate pe un schelet metalic sau din lemn, pe care sînt fixate role de ghidare (fig. 62).

Transportoarele elicoidale numite și transportoare cu melc sau șnec, sînt formate dintr-un jgheab *1*, în formă de U, în interiorul căruia se rotește o suprafață elicoidală *5*, fixată pe un arbore *2*, sprijinit pe lagărele de cap *3*, precum și pe unul sau mai multe lagăre intermediare *4* (fig. 63). Suprafața elicoidală poate avea diferite forme: elice plană, elice bandă, elice cu margini dințate sau palete dispuse în elice. Materialul de transportat, datorită greutății proprii și forțelor de frecare cu pereții jgheabului, nu se rotește odată cu suprafața elicoidală, ci este deplasat prin împingere către capătul de descărcare *8*. Se utilizează la transportul pe direcția orizontală sau cu înclinări pînă la 20° a materialelor solide granulare sau pulverulente și chiar a pastelor pe distanțe de pînă la 40 m.

Transportoarele oscilante și vibrante. Transportul materialului în aceste utilaje se bazează pe aceleași principii ca ale ciururilor oscilante și vibrante;

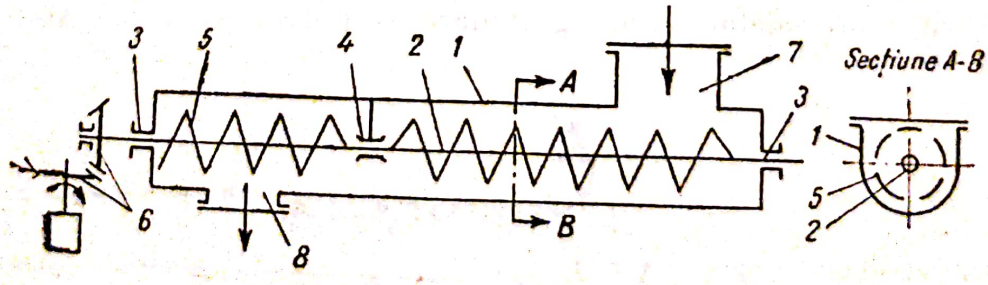


Fig. 63. Schema de principiu a unui transportor cu melc:
1 — jgheab; *2* — arbore; *3* — lagăre de capăt; *4* — lagăr intermediar; *5* — suprafață elicoidală; *6* — angrenaj cu roți conice; *7* — alimentare; *8* — descărcare.

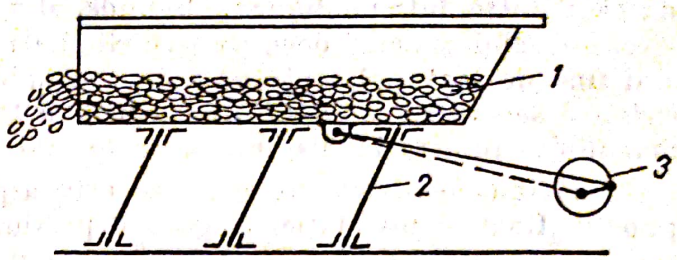


Fig. 64. Schema unui transportor oscilant.

în cazul transportoarelor, suprafaţa de transport nu este prevăzută cu orificii. Constructiv, un transportor din această categorie (fig. 64) constă dintr-un jgheab *1* sau dintr-o conductă susţinută pe picioare elastice *2* şi din mecanismul de acţionare *3*.

Transportoarele oscilante şi vibrante constituie transportoarele de perspectivă din industria chimică, pentru materiile granulare sau pulverulente. Ele prezintă avantaje deosebite faţă de celelalte categorii de transportoare, mai ales în cazul materialelor pulverulente, toxice sau fierbinţi. Pot asigura transportul a 250 t/h material, la distanţe pînă la 100 m.

Transportoare pneumatice. Principiul transportoarelor pneumatice se bazează pe antrenarea particulelor de material solid într-un curent de aer care circulă prin conductele transportoare; conducta poate fi orizontală sau verticală.

Curentul de aer necesar transportului pneumatic poate fi suflat pe conducta transportoare, în imediata vecinătate a materialului de transportat sau poate fi realizat, prin aspiraţia aerului la celălalt capăt al conductei. Cînd funcţionează pe principiul suflării aerului în conductă, se spune că transportul acţionează prin *refulare*, iar în celălalt caz, prin *aspiraţie*.

La transportoarele pneumatice prin refulare (fig. 65) presiunea aerului refulat de compresorul *1* atinge 2—5 at. În punctul final de transport, con-

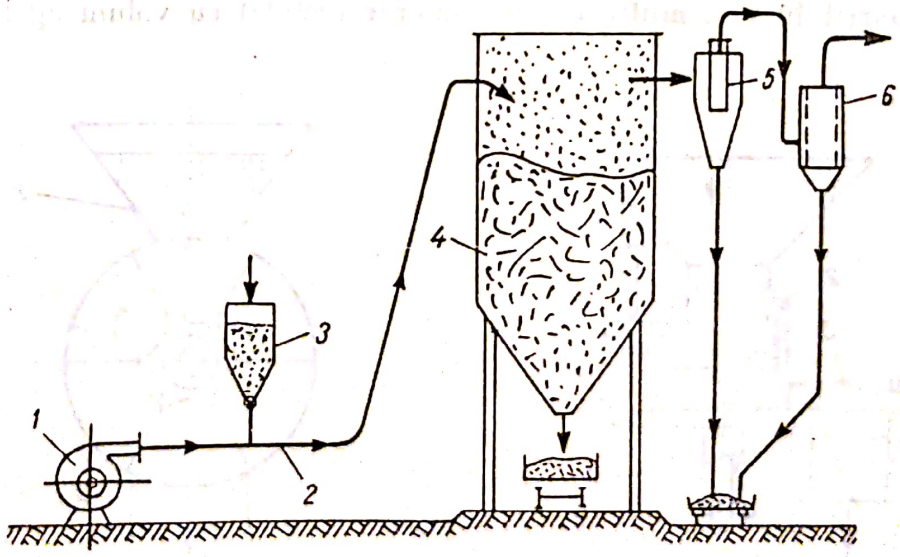


Fig. 65. Instalaţie de transport pneumatic prin refulare:
1 — compresor; *2* — conductă transportoare; *3* — siloz de alimentare; *4* — buncăr de descărcare; *5* — ciclon; *6* — filtru cu saci.

ducta *2* intră într-un buncăr *4*, unde, din cauza secţiunii mari a acestuia, viteza aerului scade şi deci, particulele mari de material se depun. Particulele mai fine de material, antrenate în continuare de aer, sînt separate într-un ciclon *5* sau filtru *6*. Se utilizează pentru transportul dintr-un singur loc în mai multe puncte la distanţe pînă la 300 m.

La transportoarele pneumatice prin aspiraţie un exaustor montat după punctul final al instalaţiei asigură depresiunea necesară (0,5 — 0,6 at) aspiraţiei curentului de aer necesar antrenării materialului. Instalaţia necesită o bună etanşeitate a utilajelor. Se utilizează la transportul materialelor solide granulare din mai multe puncte într-unul singur la distanţe pînă la 100 m.

c. Dozarea

Aparatele pentru măsurarea debitelor sau a cantităţilor de materiale granulare şi pulverulente se numesc *dozatoare.*

Pot fi utilizate ca dozatoare toate tipurile de transportoare descrise. Se folosesc însă ca dozatoare transportoarele cu melc şi într-o măsură mai mică, transportoarele cu bandă. În afară de acestea, mai răspîndite sînt dozatoarele cu taler şi dozatorul rotativ, compartimentat.

Dozatorul cu taler (fig. 66) constă dintr-un taler rotativ *1*, montat sub silozul de material *4*. Materialul curge din siloz printr-un cilindru scurt *2* (manşon de reglare), cade pe talerul rotativ şi este îndepărtat de pe acesta cu ajutorul unei raclete *3*. Debitul se reglează atît prin poziţia cilindrului şi a racletei, cît şi prin turaţia talerului.

Dozatorul rotativ compartimentat (fig. 67) este format dintr-un rotor *1* împărţit în mai multe compartimente (celule) cu volum egal, care se

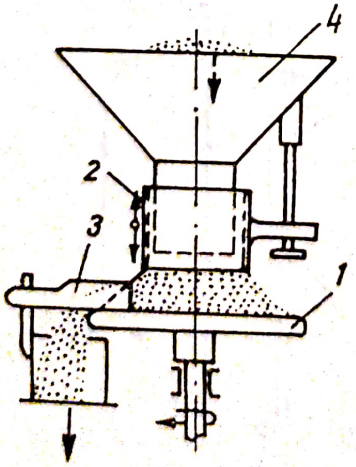


Fig. 66. Dozator cu taler.

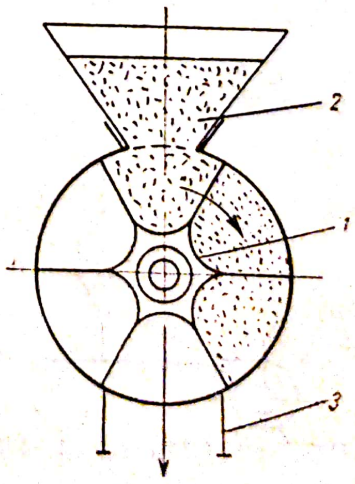


Fig. 67. Dozator rotativ compartimentat.

Scanned with OKEN Scanner

roteşte cu turaţie mică, într-un tambur cilindric, montat la ieşirea din siloz sau la capătul unei pîlnii de alimentare *2*. Debitul de alimentare este funcţie de volumul compartimentelor şi de turaţia rotorului.

Verificarea cunoştinţelor

1. Care sînt tipurile mai importante de depozite?
2. Descrieţi construcţia şi funcţionarea transportoarelor cu bandă.
3. Enumeraţi avantajele transportoarelor oscilante şi vibrante faţă de celelalte transportoare.
4. Definiţi transportul pneumatic. Daţi exemple de transportoare pneumatice din procese tehnologice cunoscute.
5. Ce se înţelege prin dozarea materialelor? Daţi cîteva exemple de dozatoare.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul IV

OPERAȚII HIDRODINAMICE

O deosebită importanță în desfășurarea proceselor și fabricațiilor chimice, atît din punctul de vedere al circulației materialelor și al operațiilor fizice, cît și din punctul de vedere al transformărilor chimice, o au fluidele. *Prin* **fluide** *se înțeleg lichidele și gazele*; sînt considerate fluide *și amestecurile eterogene lichid-solid și gaz-solid* care au comportare asemănătoare lichidelor și gazelor.

1. CURGEREA FLUIDELOR

Proprietatea fundamentală a fluidelor este aceea de a curge, adică de a lua forma vasului în care se găsesc. Curgerea fluidelor nu se referă numai la transportul fluidelor (curgerea prin conducte), ci la mișcarea (deplasarea) care are loc într-un fluid atunci cînd este supus acțiunii unor forțe care nu se găsesc în echilibru.

a. Noțiuni generale

Asupra unui fluid în repaus sau în mișcare acționează forțe de presiune, forțe de frecare (datorită viscozității), precum și masa sa proprie.

Cînd rezultanta acestor forțe acționează asupra unei arii A, produce o presiune p, numită *presiune hidrostatică*, a cărei valoare este dată de raportul:

$$p = \frac{F}{A} \tag{56}$$

Pentru un fluid de densitate ρ, care se găsește în repaus absolut într-un cîmp de forțe gravitațional cu accelerația g, presiunea hidrostatică în punctul a situat la distanța z de la suprafața lichidului (fig. 68), este dată de relația:

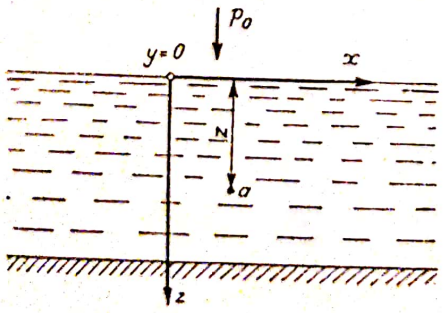


Fig. 68. Determinarea presiunii hidrostatice într-un lichid.

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot z, \tag{57}$$

care reprezintă *ecuația fundamentală a hidrostaticii, sub formă integrată*, pentru lichide în repaus absolut care se găsesc într-un cîmp gravitațional.

Viscozitatea exprimă rezistența internă a unui fluid în curgere.

Scanned with OKEN Scanner

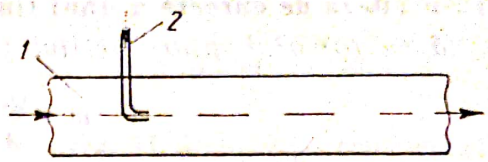


Fig. 69. Determinarea regimului de curgere:
1 — conductă de sticlă; 2 — tub de sticlă cu lichid colorat.

Viscozitatea dinamică η *depinde de proprietăţile fizice ale lichidului şi variază cu temperatura şi presiunea.* La lichide, viscozitatea dinamică scade cu temperatura, iar la gaze, creşte; la gaze, viscozitatea nu este influenţată de presiune, dar la lichide viscozitatea creşte cu presiunea. Unitatea de măsură a viscozităţii în sistemul C.G.S. se numeşte poise (se citeşte poaz) şi se notează cu litera $P = g/cm \cdot s$, iar în sistemul S.I., unitatea de măsură este decapoazul (daP).

Viscozitatea cinematică ν *se defineşte ca raportul dintre viscozitatea dinamică şi densitatea lichidului respectiv.* Unităţile de măsură ale viscozităţii cinematice sînt stokes (St) (se citeşte stoks) $St = cm^2/s$ în sistemul C.G.S. şi decakilostokesul (dakSt) $dakSt = m^2/s$ în S.I.

Regimuri de curgere a fluidelor. Curgerea unui fluid printr-o secţiune oarecare se caracterizează prin deplasarea straturilor sau particulelor care constituie fluidul respectiv. În funcţie de natura, de direcţia şi de intensitatea acestor deplasări, curgerea poate fi definită ca *laminară* sau *turbulentă.* Caracterul curgerii unui lichid se poate studia cu ajutorul unei conducte de sticlă în care curge un lichid incolor a cărui viteză poate fi variată într-un interval foarte larg (fig. 69). În centrul conductei se introduce, cu ajutorul unui tub subţire de sticlă, o vînă de lichid colorat. La valori mici ale vitezei de curgere a lichidului incolor, vîna de lichid colorat curge paralel cu pereţii conductei fără a se amesteca cu lichidul incolor.

Regimul de curgere în care straturile sau particulele de lichid se deplasează paralel între ele şi cu pereţii conductei se numeşte, în hidrodinamică, **curgere laminară** sau **regim laminar de curgere.**

Dacă se măreşte treptat viteza de curgere a lichidului incolor, se ajunge la un moment dat cînd vîna de lichid colorat se mişcă dezordonat, în vîrtejuri, pierzîndu-şi individualitatea şi amestecîndu-se în masa lichidului incolor.

Regimul de curgere în care straturile şi particulele de lichid se deplasează pe traiectorii neregulate, cu viteze diferite ca sens şi mărime, se numeşte **curgere turbulentă** cu un **regim turbulent de curgere.**

Viteza la care are loc trecerea de la curgerea laminară la cea turbulentă se numeşte **viteză critică.** Trecerea de la un regim de curgere la altul are loc la valori bine determinate ale complexului wd/υ. Acest complex adimensional de mărimi fizice şi geometrice se numeşte, în hidrodinamică, *criteriul lui Reynolds* şi se notează cu simbolul Re:

$$\boxed{Re = \frac{w \cdot d}{\upsilon} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta}.} \qquad (58)$$

Curgerea va fi totdeauna laminară dacă criteriul Reynolds va avea o valoare $R_e \leqslant 2\,300$ şi va fi turbulentă pentru valorile $R_e \geqslant 3\,000$; pentru valori $2\,300 < Re < 3\,000$ curgerea poate fi sau laminară sau turbulentă, funcţie de perturbaţiile exterioare.

Scanned with OKEN Scanner

Prin **viteza de curgere a unui fluid într-o conductă** *se înțelege viteza medie calculată ca raportul dintre debitul fluidului și aria secțiunii de curgere:*

$$w = \frac{Q_v}{A} = \frac{Q_m}{\rho \cdot A}; \tag{59}$$

în care:

Q_v este debitul fluidului, în m^3/s;
Q_m — debitul masic al fluidului, în Kg/s;
A — aria secțiunii conductei, în m^2;
w — viteza medie în conductă, în m/s.

b. Ecuațiile fundamentale ale dinamicii fluidelor

La curgerea în regim staționar a unui fluid printr-o conductă de secțiune variabilă, debitul de curgere va rămîne constant în toate punctele conductei (altfel ar avea loc acumulări de fluid în conductă), însă viteza sa va varia astfel ca în orice secțiune să fie valabile relații de forma:

$$Q_m = w_1 \cdot \rho_1 \cdot A_1 = w_2 \cdot \rho_2 \cdot A_2 = w_3 \cdot \rho_3 \cdot A_3 = \text{const}, \tag{60}$$

$$Q_v = w_1 \cdot A_1 = w_2 \cdot A_2 = w_3 \cdot A_3 = \text{const}. \tag{61}$$

Aceste ecuații reprezintă ecuațiile de continuitate ale curentului respectiv de fluid. Ele servesc fie la calcularea vitezei cînd se cunoaște aria secțiunii, cu relația (59), fie la calculul diametrului conductei circulare, cu relația:

$$d = \sqrt{\frac{4Q_m}{\pi \cdot w \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{4Q_v}{\pi \cdot w}}; \tag{62}$$

Ecuația lui Bernoulli. O masă de lichid în mișcare, posedă o energie oarecare reprezentînd suma energiei interne, energiei potențiale și energiei cinetice. Prin stabilirea bilanțului energiilor pentru un curent de lichid în curgere se deduce ecuația lui Bernoulli.

Energia internă reprezintă energia moleculelor fluidului care se găsesc în continuă mișcare și deci posedă energie cinetică corespunzătoare acestor mișcări. Energia internă pentru unitatea de masă de fluid se notează cu u și se exprimă în J/kg.

Energia potențială cuprinde energia potențială de presiune și energia potențială de poziție. Energia potențială de presiune reprezintă energia mecanică pe care o poate efectua un volum oarecare de fluid la presiune constantă. Notîndu-se cu v volumul specific (volumul unității de masă) și cu p presiunea, se obține, pentru energia potențială de presiune, expresia $p \cdot v$ sau p/ρ, deoarece $v = \frac{1}{\rho}$.

Energia potențială de poziție este egală cu produsul dintre greutate și înălțime, adică $m \cdot g \cdot z$; pentru unitatea de masă $m = 1$, expresia energiei de poziție ia forma $g \cdot z$.

Energia cinetică reprezintă energia de mișcare a masei de lichid considerat; pentru unitatea de masă, energia cinetică $= \frac{w^2}{2}$.

Scanned with OKEN Scanner

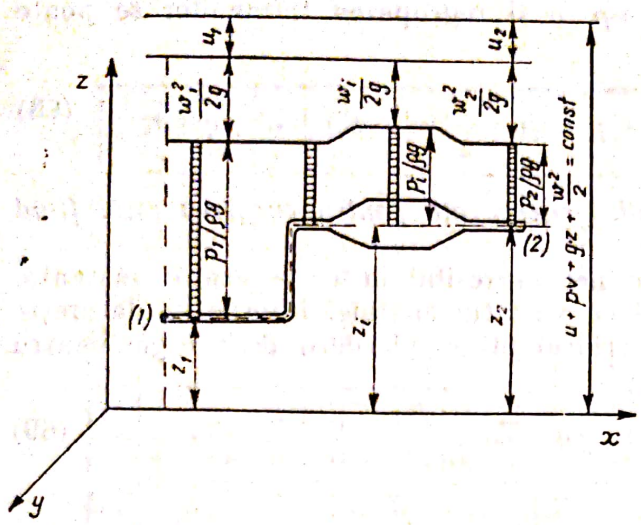


Fig. 70. Reprezentarea grafică a ecuației lui Bernoulli.

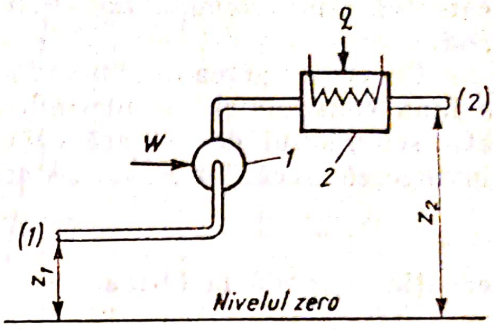


Fig. 71. Deducerea ecuației lui Bernoulli generalizată.

Energia totală a unui kilogram de fluid va reprezenta suma:

$$E = u + p \cdot v + g \cdot z + \frac{w^2}{2}, \tag{63}$$

sau, ținîndu-se seama de relația cunoscută $h = u + p \cdot v$,

$$E = h + g \cdot z + \frac{w^2}{2}, \tag{64}$$

în care h reprezintă entalpia unui kilogram de fluid, în J/kg.

Se consideră curgerea unui lichid ideal (fără frecare internă) printr-o conductă de forma indicată în figura 70, în regim staționar, fără schimb de energie (mecanică sau calorică) cu exteriorul. Aplicînd ecuația (63) pentru acest caz în punctele *1* și *2* ale conductei, se obține relația:

$$u_1 + p_1 \cdot v_1 + g \cdot z_1 + \frac{1}{2} w_1^2 = u_2 + p_2 \cdot v_2 + g \cdot z_2 + \frac{1}{2} w_2^2, \tag{65}$$

care pentru energia internă constantă ($u_1 = u_2$) lichide necompresibile ($v_1 = v_2$ sau $\rho_1 = \rho_2$) și ia forma:

$$\boxed{g \cdot z_1 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} = g \cdot z_2 + \frac{w_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2}.} \tag{66}$$

Ecuația lui Bernoulli generalizată. Se consideră curgerea unui fluid real printr-o conductă pe al cărei traseu sînt montate o pompă sau un compresor și un încălzitor (schimbător de căldură) (fig. 71). Lucrul mecanic introdus în sistemul respectiv, pentru unitatea de masă, se notează cu W, iar căldura cu q. Considerîndu-se curgerea în regim staționar, aplicarea ecuației pentru stabilirea bilanțului energiilor, ecuația (65), pentru secțiunile *1* și *2*, duce la obținerea relației generale:

$$h_1 + g \cdot z_1 + \frac{w_1^2}{2} + W + q = h_2 + g \cdot z_2 + \frac{w_2^2}{2}, \tag{67}$$

Scanned with OKEN Scanner

care prin înlocuirea relației $h=u+p\cdot v$ și regruparea termenilor se poate scrie sub forma:

$$g(z_1-z_2)+(u_1-u_2)+(p_1\cdot v_1-p_2\cdot v_2)+\frac{1}{2}(w_1^2-w_2^2)+W+q=0, \tag{68}$$

care reprezintă *ecuația lui Bernoulli generalizată pentru curgerea unui fluid real.*

Pentru curgerea unui lichid real, necompresibil, la temperatură constantă, v fiind constant și considerîndu-se că variația energiei interne se datorește atît schimbului de căldură cu exteriorul cît și pierderii de energie pentru învingerea frecărilor F din sistem:

$$u_1-u_2=q+F, \tag{69}$$

ecuația generală ia forma:

$$g(z_1-z_2)+v(p_1-p_2)+\frac{1}{2}(w_1^2-w_2^2)+W-F=0 \tag{70}$$

sau înlocuind $v=\frac{1}{\rho}$,

$$g(z_1-z_2)+\frac{1}{\rho}(p_1-p_2)+\frac{1}{2}(w_1^2-w_2^2)+W-F=0. \tag{71}$$

Aceste relații sînt utilizate foarte mult în rezolvarea unor probleme de curgere a lichidelor. În această formulă, F reprezintă energia specifică de frecare avînd aceleași dimensiuni ca și ceilalți parametrii ai relației (71).

c. Frecarea și căderea de presiune la curgerea fluidelor

Prin curgerea unui fluid real, datorită frecărilor interne, frecărilor dintre fluid și pereții care limitează curgerea, precum și datorită învingerii unor rezistențe locale care determină variația vitezei ca mărime și ca sens, are loc o pierdere (cădere) a presiunii fluidului măsurată în lungul curentului considerat. Valoarea căderii de presiune depinde atît de natura lichidului cît și de condițiile în care are loc curgerea.

Curgerea prin conducte. Pentru calculul căderii de presiune Δp la curgerea unui fluid printr-o conductă cu diametrul d și lungimea l se utilizează formula:

$$\Delta p=\lambda\frac{l}{d}\cdot\frac{w^2\cdot\rho}{2}, \tag{72}$$

în care:

w este viteza de curgere;
ρ — densitatea lichidului;
λ — coeficientul de frecare,

cunoscută sub numele de *ecuația lui Fanning.* Uneori căderea de presiune se exprimă sub forma căderii de nivel (a coloanei de fluid corespunzătoare).

Scanned with OKEN Scanner

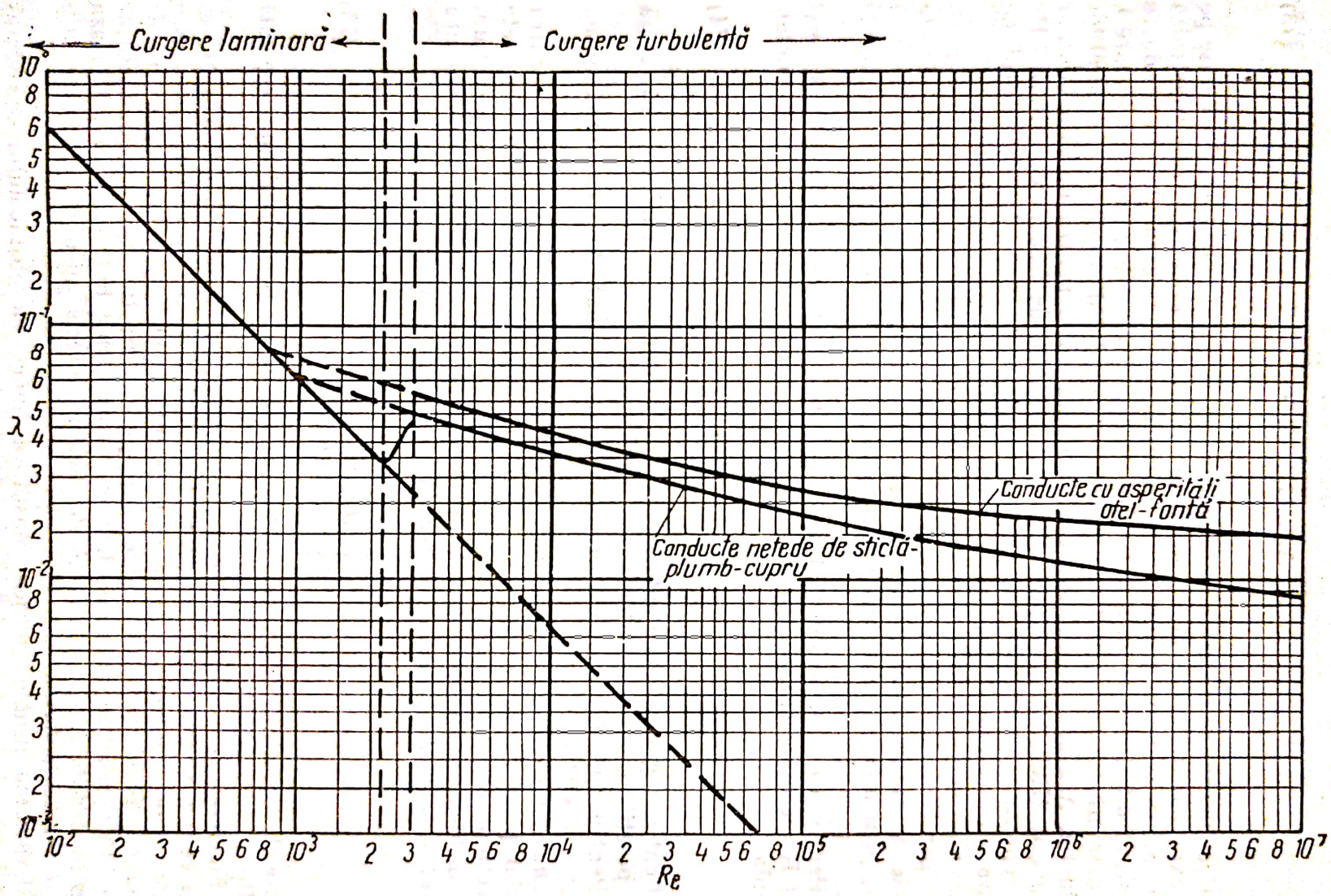


Fig. 72. Diagrama λ, Re.

Pentru aceasta se împart ambii membri ai relației (72) cu ρg și ecuația lui Fanning ia forma:

$$\Delta Z_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \tag{73}$$

Coeficientul de frecare λ se calculează cu ajutorul unor formule deduse pe cale experimentală sau, mai simplu, din diagrama λ-Re (fig. 72), construită de asemenea în urma a numeroase experiențe cu fluide curgînd în conducte de natură diferită. S-a constatat astfel că variația coeficientului de frecare λ este determinată de regimul de curgere și de gradul de rugozitate al pereților conductei. Așa cum se observă din diagrama λ-Re, pentru regimul laminar de curgere ($Re < 2\,300$), dependența coeficientului de frecare de criteriul Re este reprezentată printr-o linie avînd panta egală cu -1; coeficientul de frecare nu depinde de natura pereților conductei (de rugozitate).

Pentru curgerea turbulentă, coeficientul de frecare λ depinde de rugozitatea pereților, variația lui fiind reprezentată printr-un fascicul de drepte funcție de natura conductelor. În figura 72 nu s-au reprezentat decît două curbe: pentru conducte netede și pentru conducte cu un grad mare de rugozitate.

Pentru calculul analitic al coeficientului de frecare λ funcție de criteriul Re se utilizează pentru regim laminar, indiferent de natura conductei, formula:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \tag{74}$$

Pentru regimul turbulent de curgere, formulele de calcul diferă, după cum pereții conductelor sînt netezi sau rugoși.

Pentru apă, în cazul curgerii turbulente se poate lua, cu aproximație, valoarea $\lambda = 0{,}03$.

Diametrul echivalent sau diametrul hidraulic. Formulele și relațiile pentru calculul pierderii de presiune se referă la curgerea fluidelor prin conducte cu secțiune circulară. Ele sînt, de asemenea, valabile și pentru alte secțiuni dacă în locul diametrului se introduce o altă lungime caracteristică, numită diametru echivalent sau diametru hidraulic, calculat cu relația:

$$d_e = 4 \frac{A}{P}, \tag{75}$$

în care A reprezintă aria secțiunii de curgere, iar P perimetrul udat (spălat) de fluid.

Pierderea de presiune datorită rezistențelor hidraulice. Obstacolele hidraulice: coturi, ventile, teuri, robineți, îngustări și lărgiri de secțiune etc., care se găsesc pe conducte, numite și rezistențe locale, introduc o pierdere de presiune suplimentară față de cea corespunzătoare frecărilor în conducta ca atare. Pierderile de presiune datorită obstacolelor hidraulice se calculează fie prin *metoda lungimii echivalente*, fie, mai precis, prin *metoda coeficienților de rezistență locală.*

Utilizarea primei metode constă în înlocuirea obstacolului considerat printr-o lungime echivalentă de conductă care produce aceeași pierdere de

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3

Valoarea coeficientului n pentru obstacole hidraulice

Felul rezistenței locale	n	Felul rezistenței locale	n
Cot de 45°	15	Teu pentru curgerea în sensul ⇉	90
Cot de 90°	30—50	Cruce	50
Cot de 90° drept	60	Ventil	60—300
Teu pentru curgere în sensul → ↑	60	Robinet	10— 15

presiune. Lungimea echivalentă l_e apare ca un produs între diametrul interior d al conductei și un număr n care depinde de felul rezistenței hidraulice considerate, $l_e = n \cdot d$ (tabela 3).

Lungimea echivalentă astfel calculată se introduce în relația (72) pentru calculul căderii de presiune în conducte. În acest mod relația pentru calculul pierderii de presiune pe întregul circuit (conducta ca atare plus rezistențele hidraulice) ia forma:

$$\Delta p = \lambda \frac{l + \Sigma n \cdot d}{d} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}. \tag{76}$$

Metoda mai exactă a coeficientului de rezistență ξ presupune determinarea valorii acestuia pentru fiecare obstacol hidraulic și calcularea pierderii de presiune corespunzătoare cu relația:

$$\Delta p = \xi \frac{w^2 \cdot \rho}{2}. \tag{77}$$

Pierderea totală de presiune (a conductei ca atare plus a obstacolelor considerate) se calculează tot cu relația (72) introducîndu-se în plus suma coeficienților de rezistență $\Sigma\xi$:

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma\xi\right) \frac{w^2 \rho}{2} \tag{78}$$

Valorile coeficientului de rezistență se determină cu ajutorul unor formule, tabele sau diagrame care se găsesc în literatura de specialitate. În tabela 4 sînt date valorile coeficientului de rezistență pentru unele obstacole hidraulice.

Curgerea prin straturi granulare și umpluturi. Pentru efectuarea unor operații unitare, cum sînt rectificarea, absorbția, extracția, se utilizează coloane sau turnuri în care sînt dispuse corpuri de umplere, bulgări, granule sau umpluturi de formă definită, din materiale ceramice sau din materiale speciale, produse în acest scop. Curgînd prin aceste straturi fluidele sînt dirijate în filme, picături sau bule, îmbunătățindu-se astfel contactul dintre ele. În figura 73 sînt reprezentate corpurile de umplere mai des utilizate.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 4

Valori ale coeficientului de rezistență ξ

Felul rezistenței locale	ξ	Felul rezistenței locale	ξ
Cot de 90° drept	1,1—1,3	Vană:	
Curbă de conductă	0,14	— jumătate deschisă	2,8
Robinet:		— complet deschisă	0,1
— deschis la un unghi de 30—40°	4—11		
— complet deschis	0,2	Ventil	2,5—5,5

Pentru definirea straturilor granulare și a umpluturilor și pentru caracterizarea curgerii prin aceasta se folosesc următorii factori: suprafața specifică a umpluturii σ, diametrul mediu de volum și de suprafață, sfericitatea ψ și fracția de goluri ε. Pentru caracterizarea curgerii se determină viteza fictivă, diametrul echivalent și căderea de presiune.

Viteza fictivă w_f reprezintă viteza pe care ar avea-o fluidul dacă ar curge prin coloana cu umplutură, fără a se considera volumul ocupat de aceasta;

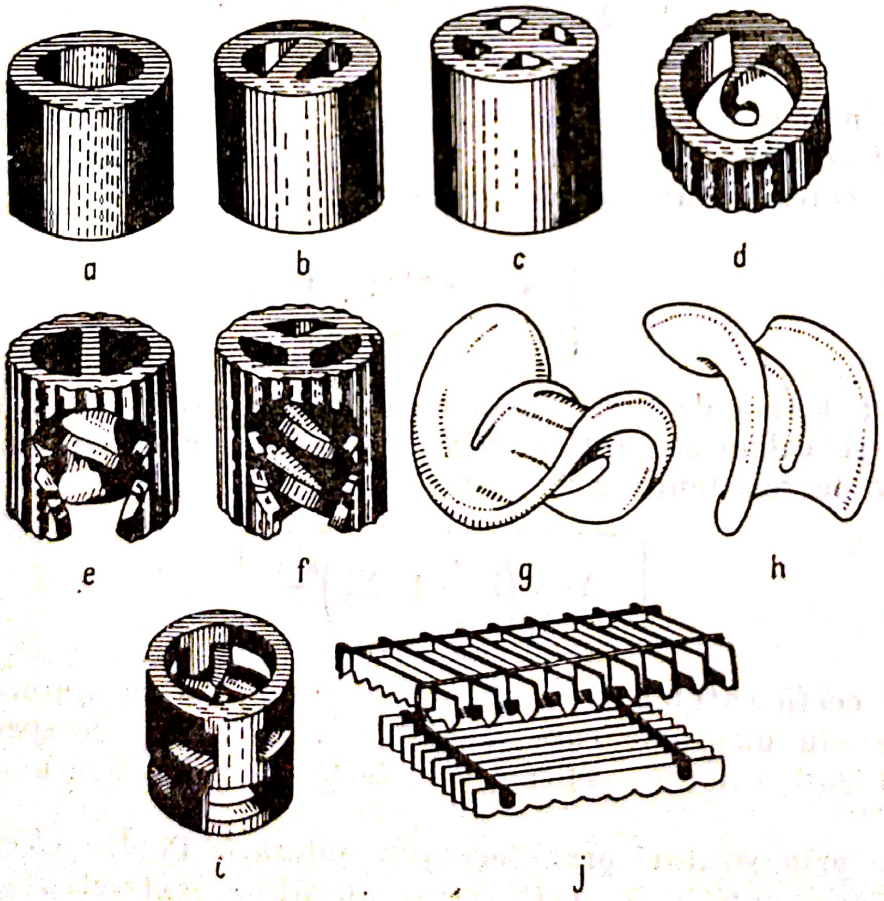


Fig. 73. Corpuri de umplere:

a — inele Raschig; *b* — inele Lessing; *c* — inele cu pereți interiori încrucișați; *d* — inele cu spirală simplă; *e* — inele cu spirală dublă; *f* — inele cu spirală triplă; *g* — șei Berl; *h* — șei Intalaks; *i* — inele Pall; *j* — grătare.

Scanned with OKEN Scanner

viteza fictivă se calculează considerîndu-se coloana goală, adică raportul debitului fluidului Q_v la întreaga secţiune a coloanei:

$$w_f = \frac{Q_v}{A}. \qquad (79, a)$$

Dacă umplutura considerată are fracţia de goluri ε, definită ca raportul dintre volumul golurilor şi volumul total ocupat de umplutură, atunci viteza reală a fluidului în coloana cu umplutură se calculează cu relaţia:

$$w = \frac{w_f}{\varepsilon}. \qquad (79, b)$$

Diametrul echivalent d_e al umpluturii se calculează cu formula:

$$d_e = 4\frac{A}{P} = 4\frac{A\varepsilon}{A\sigma} = \frac{4\varepsilon}{\sigma}, \qquad (80)$$

Pierderea de presiune prin stratul de umplutură se calculează cu ajutorul formulei (72) scrisă pentru curgerea prin straturi granulare:

$$\Delta p = \lambda \frac{l \cdot w_f^2 \cdot \rho}{d_e \cdot 2\varepsilon^2}, \qquad (81)$$

în care:

l este grosimea stratului de umplutură, în m.

Valoarea coeficientului de frecare λ se calculează, funcţie de criteriul Reynolds.

d. Conducte şi armături folosite în industria chimică şi petrolieră

În toate combinatele şi uzinele industriei chimice şi petroliere există reţele de conducte şi canale prin care circulă fluide (lichide, gaze, abur etc.) în diferite condiţii de presiune, temperatură sau concentraţie. Deoarece transportul materialelor în stare fluidă este mai economic, s-a ajuns la o mare diversitate de tipuri de conducte, în funcţie atît de natura cît şi de caracteristicile materialelor transportate.

O conductă pentru transportul fluidelor constă din următoarele părţi principale: conducta propriu-zisă sau tubulatura (ţevi sau tuburi, conducte), piese de îmbinare şi legătură între conducte (mufe, flanşe, reducţii, coturi, teuri etc.) şi armături pentru comanda şi controlul curgerii fluidelor (robinete, vane, clapete de reţinere).

1) Standardizarea conductelor

În funcţie de condiţiile de lucru ale conductelor — temperatură, presiune şi acţiunea chimică a fluidului transportat — se folosesc conducte construite atît din materiale metalice (metale pure, fontă, oţel, aliaje) cît şi din materiale

Scanned with OKEN Scanner

nemetalice (sticlă, materiale plastice, cauciuc, materiale ceramice). O mare răspîndire au cunoscut în ultimul timp, mai ales pentru transportul lichidelor corosive, conductele construite din polietilenă și din P.C.V; pentru temperaturi mai mari se utilizează conducte din polipropilenă.

Pentru a se reduce numărul de tipuri de conducte și pentru a se ușura asamblarea și îmbinarea lor, conductele, piesele de legătură și armăturile au fost standardizate.

Conductele metalice sînt standardizate după diametrul nominal D_n și după presiunea nominală P_n.

Pe baza standardizării după diametrul nominal (conform STAS 2099-65) se construiesc țevi, piese de legătură și armături pentru conductele cu diametrul exprimat în milimetri sau țoli (1 țol=25,4 mm), de la 1 mm pînă la 2 200 mm.

Standardizarea după presiunea nominală (STAS 2250-63) stabilește presiunile de lucru sau de regim ale conductei funcție de temperatura și acțiunea chimică a fluidului de transportat. Prin presiune nominală se înțelege presiunea pentru care a fost construită conducta, iar prin presiune de lucru sau de regim — presiunea la care va fi pusă să funcționeze aceasta în condițiile de lucru date; s-au normalizat șase regimuri de lucru pentru temperaturi pînă la 500°C. În standardul respectiv se stabilesc și presiunile minime de încercare a conductelor care sînt de cel puțin 1,5 ori mai mari decît presiunea nominală.

2) Îmbinarea conductelor

Uzinele constructoare livrează țevile în lungimi normale de la 4 la 11 m. Prin îmbinarea acestor țevi cu ajutorul pieselor de legătură și al armăturilor se realizează conducte continue, cu lungimea necesară. Țevile se pot îmbina *prin sudare* (mai ales pentru țevile din oțel) sau *prin asamblarea cu ajutorul pieselor de legătură.*

Îmbinarea prin sudare prezintă avantajele simplității și al siguranței, însă, în cazul defectării unei porțiuni de conductă, este necesar ca aceasta să fie tăiată și îndepărtată. De aceea, această metodă se utilizează pentru realizarea conductelor de lungime mare și pentru temperaturi mari.

Îmbinarea cu piese de legătură permite demontarea și înlocuirea părților defecte ale conductei, chiar fără întreruperea funcționării instalației respective. Cele mai utilizate piese de legătură sînt: flanșele, mufele, holenderele (racordul olandez), coturile, teurile și alte piese fasonate. În figura 74 sînt reprezentate schemele de principiu ale unor îmbinări cu flanșă, mufă și holender. Tuburile și piesele de legătură, care prin forma lor constructivă fac posibilă schimbarea direcției de curgere sau ramificarea curentului de fluid, se numesc *fitinguri* (fig. 75); ele sînt folosite, mai ales, pentru conducte de apă și gaze.

Armăturile sînt dispozitivele care servesc pentru oprirea sau reglarea curgerii fluidelor prin conducte.

Principalele tipuri de armături sînt: robinete cu cep, robinete cu ventil, vane sau robinete cu pană, clapete de reținere (ventile de reținere) etc.

Robinetul cu cep (fig. 76) este un dispozitiv de închidere format dintr-un dop tronconic, găurit transversal, care se poate roti într-un locaș prelucrat

Scanned with OKEN Scanner

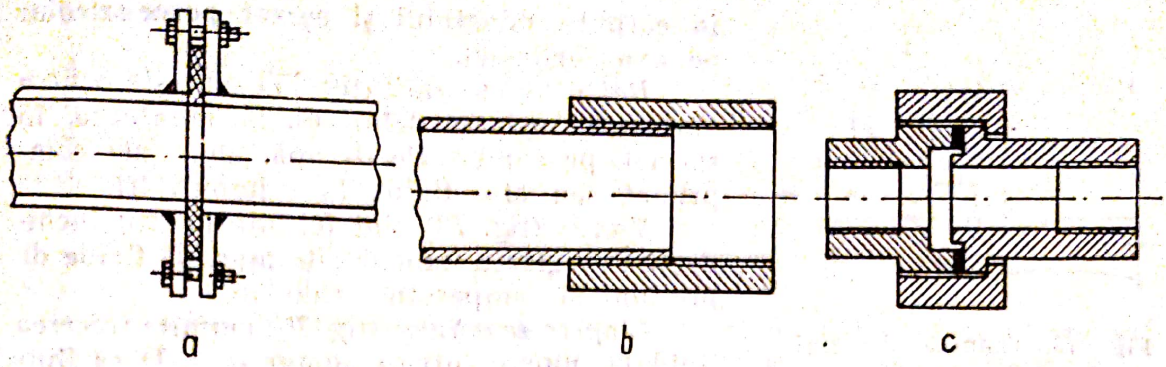


Fig. 74. Îmbinări cu piese de legătură:
a — cu flanșă sudată; *b* — cu mufă înșurubată; *c* — cu holender.

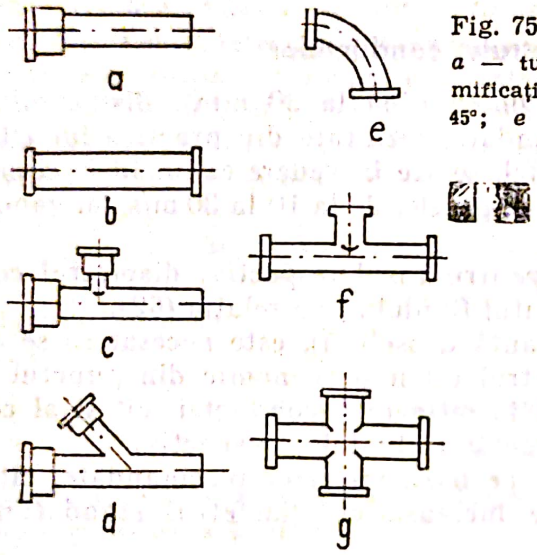


Fig. 75. Tuburi și piese de legătură din fontă:
a — tub cu mufă; *b* — tub cu flanșe; *c* — ramificație simplă la 90°; *d* — ramificație simplă la 45°; *e* — cot de 90° cu flanșe; *f* — teu cu flanșe; *g* — cruce cu flanșe.

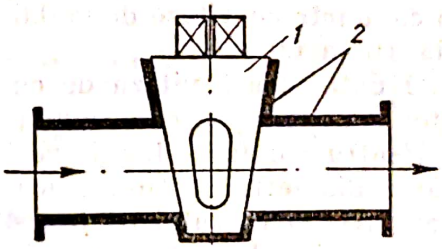


Fig. 76. Robinet cu cep:
1 — dop tronconic; *2* — corpul robinetului.

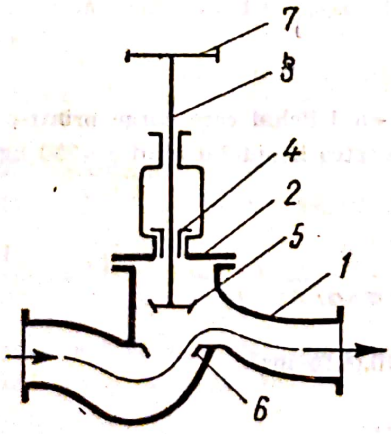


Fig. 77. Robinet cu ventil:
1 — corpul robinetului; *2* — capac; *3* — tijă filetată; *4* — garnitură de etanșare; *5* — ventil; *6* — scaunul ventilului; *7* — roată de manevrare.

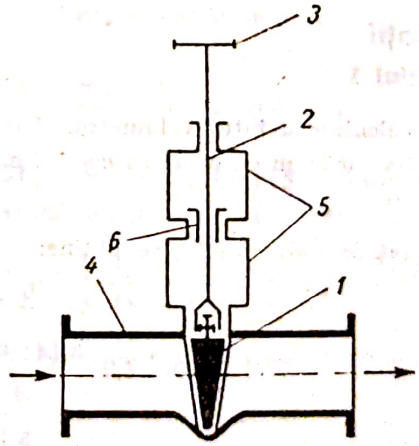


Fig. 78. Robinet cu pană (vană):
1 — pană; *2* — tijă filetată; *3* — roată de manevrare; *4* — corpul robinetului; *5* — capac; *6* — garnitură de etanșare.

Scanned with OKEN Scanner

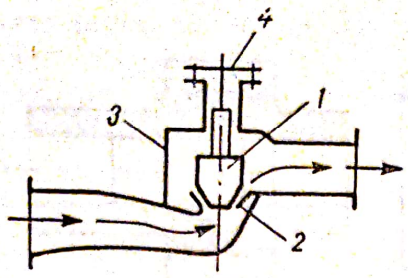


Fig. 79. Clapetă de reținere:
1 — ventil; *2* — scaunul ventilului; *3* — corpul clapetei; *4* — capac.

în corpul robinetului și așezat perpendicular pe axa conductei.

Robinetul cu ventil (fig. 77) servește pentru oprirea și reglarea debitului. Se montează, în special, pe conductele de apă, abur, aer comprimat sau alte fluide fără impurități.

Vanele (fig. 78) sînt folosite pentru închiderea și reglarea unor debite mari de fluide de presiuni și temperaturi ridicate.

Clapeta de reținere (fig. 79) permite trecerea fluidului numai într-un singur sens. Dacă fluidul are tendința de a curge în sens contrar, atunci ventilul se închide în mod automat și oprește curgerea.

3) Alegerea diametrului conductelor

Pentru conductele scurte (cu lungimea pînă la 30 mm), diametrul se calculează pe baza unor viteze recomandate, rezultate din practica industrială a uzinelor chimice și petroliere. Astfel, se are în vedere că lichidele circulă prin conducte cu viteze de la 0,6 la 5 m/s, gazele, de la 10 la 30 m/s, iar vaporii de la 10 la 60 m/s.

O dată aleasă viteza de curgere pentru cazul respectiv, diametrul conductei se calculează, cunoscîndu-se debitul fluidului, cu relația (62).

Pentru conducte lungi (de importanță deosebită), este necesar să se determine diametrul optim, adică diametrul cel mai economic din punctul de vedere atît al costului de investiție și întreținere a conductei, cît și al costului energiei de pompare prin conductă a fluidului respectiv.

Atît în cazul diametrului calculat pe baza vitezelor recomandate, cît și în cazul determinării diametrului, se lucrează cu diametrul standardizat cel mai apropiat.

Aplicații

Exercițiul 1

Să se calculeze debitul volumetric și masic al unui lichid care curge printr-o conductă cu diametrul $d=0{,}21$ m cu o viteză $w=1{,}2$ m/s, densitatea lichidului fiind $\rho=890$ kg/m³.

Rezolvare

Din ecuațiile (60) și (61) se obține:

$$Q_v=w\cdot A \text{ și } Q_m=w\cdot\rho\cdot A;$$

$$Q_v=1{,}2\,\frac{3{,}14\times 0{,}21^2}{4}=0{,}0415 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_m=1{,}2\times 890\,\frac{3{,}14\times 0{,}21^2}{4}=37 \text{ kg/s}.$$

Valorile debitelor orare se obțin înmulțindu-se valorile respective cu 3 600 s:

$$Q_v=0{,}0415\times 3\,600=149 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$Q_m=37\times 3\,600=133\,200 \text{ kg/h}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Exercițiul 2

Să se determine diametrul unei conducte prin care curge o soluție de sodă cu un debit $Q_m=46\,200$ kg/h, avînd viteza $w=1{,}65$ m/s; densitatea soluției este $\rho=1\,100$ kg/m³.

Rezolvare

Se utilizează relația (62):

$$d=\sqrt{\frac{4Q_m}{3\,600\cdot\pi\cdot\rho\cdot w}}=\frac{4\times 46\,200}{3\,600\times 3{,}14\times 1{,}65\times 1\,100}=0{,}095 \text{ m}.$$

Să se calculeze pierderile de presiune prin frecare la curgerea unei soluții de hidroxid de sodiu cu un debit $Q_v=42$ m³/h, printr-o conductă cu lungimea de 25 m; pe conductă se găsesc două ventile și două coturi de 90°. Diametrul interior al conductei $d_i=95$ mm, densitatea soluției $\rho=1\,100$ kg/m³, viscozitatea $\eta=1{,}1$ cP.

Rezolvare

Pierderea de presiune provine atît din frecările în conductă ca atare, cît și datorită rezistențelor locale (ventile, coturi). Pentru rezolvare se poate utiliza ecuația (76), metoda lungimii echivalente, sau ecuația (78), metoda coeficientului de rezistență.

a) *Metoda lungimii echivalente.* Pentru aplicarea ecuației (76) este necesară determinarea valorii coeficientului de frecare λ, a valorii numărului n și a vitezei de curgere a soluției w.

Viteza soluției în conductă se determină din relația:

$$w=\frac{Q_v}{3\,600\,A}=\frac{42\times 4}{3\,600\times 3{,}14\times 0{,}095^2}=1{,}65 \text{ m/s}.$$

Pentru determinarea coeficientului de frecare este necesar să se calculeze valoarea criteriului Re:

$$\text{Re}=\frac{w\cdot d\cdot\rho}{\eta}=\frac{1{,}65\times 0{,}095\times 1\,100}{1{,}1\times 10^{-3}}=157\,000.$$

Pentru această valoare a lui Re se obține, cu ajutorul diagramei din figura 72, coeficientul de frecare cu valoarea $\lambda=0{,}021$.

Valorile numărului n se iau din tabela 2: pentru cot de 90°, $n=40$, iar pentru ventil $n=120$. Ținîndu-se seamă că pe conductă se găsesc două coturi și două ventile, înlocuindu-se în ecuația (76) se obține:

$$\Delta p=0{,}021\,\frac{25+(2\times 40+2\times 120)0{,}095}{0{,}095}\cdot\frac{1{,}65^2\times 1\,100}{2}=21\,200 \text{ N/m}^2.$$

b) *Metoda coeficienților de rezistență.* Valorile coeficienților de rezistență se iau din tabela 4. Pentru cot de 90° ζ 1,2, iar pentru ventil $\zeta=3$. Înlocuindu-se în ecuația (78) se obține:

$$\Delta p=\left(\lambda\frac{l}{d}+\Sigma\zeta\right)\frac{w^2\cdot\rho}{2}=\left[\left(0{,}021\,\frac{25}{0{,}095}+2(1{,}2+3)\right)\right]\frac{1{,}65^2\times 1\,100}{2}\approx 21\,000 \text{ N/m}^2.$$

Se va prefera totdeauna calculul prin metoda coeficienților de rezistență, deoarece dă valori mai apropiate de realitate.

Verificarea cunoștințelor

1. Definiți presiunea hidrostatică.
2. Definiți regimul de curgere a fluidelor.
3. Ce reprezintă ecuația lui Bernoulli?
4. Ce este diametrul echivalent?

Scanned with OKEN Scanner

5. Enumerați factorii de care depinde pierderea de presiune datorită frecării la curgerea unui fluid.
6. Ce sînt corpurile de umplere? Dați cîteva exemple.
7. Ce se înțelege prin viteza medie și viteza locală la curgerea fluidelor?
8. Enumerați dispozitivele pentru măsurarea debitelor fluidelor și enunțați principiile pe care se bazează.
9. Care sînt piesele de legătură cele mai utilizate pentru îmbinarea conductelor?
10. Ce sînt armăturile? Exemple.

2. TRANSPORTUL FLUIDELOR

Transportul fluidelor în interiorul combinatelor și uzinelor chimice și petrochimice, de la un utilaj la altul, se face prin curgerea (deplasarea) acestora prin conducte, special realizate în acest scop. Energia necesară curgerii fluidului prin conductă poate fi dată de energia potențială a lichidului — cînd curgerea se face prin cădere liberă, datorită diferenței de nivel — sau poate fi furnizată de către dispozitive de pompat — cînd fluidul se transportă la un nivel mai ridicat sau i se ridică presiunea.

În mod cu totul general, aparatele și dispozitivele care servesc la transportul lichidelor se numesc *pompe*, iar cele pentru transportul și comprimarea gazelor *compresoare*.

a. Transportul lichidelor. Pompe pentru lichide

Ca urmare a condițiilor foarte variate în care trebuie să funcționeze (presiune. debit, temperatură, natura fizică și chimică a lichidului, impuritățile lichidului), pompele pentru lichide se construiesc într-o mare varietate de tipuri. După tipul constructiv și după principiul de funcționare, pompele pentru lichide se pot clasifica în patru mari categorii:

— dispozitive de pompare fără elemente mobile (dispozitive statice sifonul, montejusul, pompa Mammut, injectorul etc.);
— pompe cu mișcări alternative: cu piston, cu membrană, cu plunger etc;
— dispozitive rotative: cu roți dințate, cu pistoane rotative etc.
— pompe centrifuge.

1) Parametrii principali ai pompelor pentru lichide

În funcționarea pompelor pentru lichide, indiferent de construcția sau principiul lor de funcționare, intervin mai frecvent următorii parametri: *înălțimea de aspirație, înălțimea manometrică, debitul, randamentul și puterea.*

Scanned with OKEN Scanner

Înălțimea de aspirație. Pompa este un dispozitiv care trage (aspiră) lichidele din spațiile în care acestea se găsesc și le împinge (refulează) pe conducte pentru a fi transportate în diferite utilaje sau rezervoare. Conducta prin care se aspiră lichidul (face legătura între spațiile din care se pompează lichidele și dispozitivul de pompare) se numește *conductă de aspirație*, iar conducta prin care se pompează (refulează) lichidul respectiv (face legătura între pompă și recipientul sau utilajul în care se transportă lichidul) se numește *conductă de refulare*; rezultatul final al trecerii lichidului prin pompă este ridicarea presiunii sale.

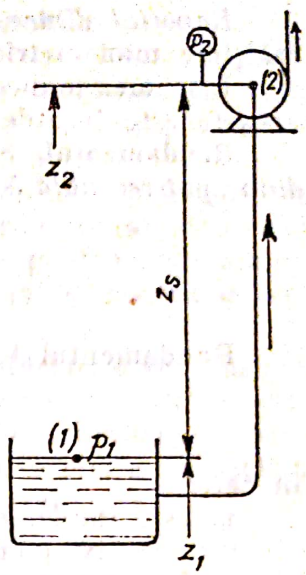


Fig. 80. Determinarea înălțimii de aspirație.

Înălțimea maximă de aspirație Z_s reprezintă distanța maximă pe verticală la care poate fi montată pompa față de suprafața lichidului din rezervorul din care se pompează; dacă se depășește valoarea maximă a acestei mărimi, pompa încetează să funcționeze. Înălțimea maximă de aspirație se determină aplicîndu-se ecuația lui Bernoulli (ecuația 71), între punctul *1* situat la suprafața lichidului din rezervorul de aspirație și punctul *2* situat la intrarea în pompă (fig. 80). Deoarece viteza w_1, la suprafața lichidului este nulă, iar pe parcursul respectiv nefiind pompă, energia specifică W este nulă, se obține:

$$-g \cdot Z_s + \frac{1}{\rho}(p_1 - p_2) - \frac{1}{2} w_2^2 - F = 0, \tag{82}$$

care (deoarece $F/g = f$ = frecarea) relația (82) poate fi pusă sub forma:

$$Z_s = \frac{p_1}{\rho \cdot g} - \left(\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2g} + f \right). \tag{83}$$

Presiunea p_2 reprezintă presiunea minimă a lichidului la intrarea în pompă și este egală cu presiunea de vapori a lichidului transportat la temperatura la care are loc pomparea.

Înălțimea de aspirație scade foarte repede cu temperatura lichidului de pompat; pentru apă, valoarea sa devine egală cu zero cînd temperatura atinge 65°C. Pentru temperaturi mai mari ale lichidelor de pompat, cu ajutorul ecuației (83) se obțin valori negative pentru înălțimea de aspirație; înseamnă că pompa trebuie montată sub rezervorul de aspirație, la distanța calculată.

Înălțimea monometrică. Scriind ecuația lui Bernoulli sub forma:

$$\frac{W}{g} = (Z_2 - Z_1) \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2 - w^2}{2g} + \frac{F}{g}, \tag{84}$$

se observă că toți termenii au dimensiunile unei lungimi astfel încît ecuația (84) se poate scrie sub forma:

$$\boxed{Z = Z_g + Z_p + Z_a + Z_f.} \tag{85}$$

Raportul dintre energia specifică W *și accelerația gravitației se numește* **înălțime manometrică** sau **înălțime hidraulică totală.**

Înălțimea manometrică Z se măsoară în metri coloană de lichid pompat; aceasta este întotdeauna mai mare decît înălțimea geometrică.

Randamentul. Se definește ca *randament total* al unei pompe, *raportul dintre puterea utilă* N_u *și puterea consumată de pompă* N;

$$\eta_t = \frac{N_u}{N}. \tag{86}$$

Randamentul total reprezintă, de asemenea, produsul:

$$\eta_t = \eta_v \cdot \eta_h \cdot \eta_m, \tag{87}$$

în care:

η_v este randamentul volumetric, definit ca raportul dintre volumul efectiv pompat și volumul corespunzător variației spațiului de pompare (0,94—0,98);

η_h — randamentul hidraulic, definit ca raport Z_g/Z, dintre înălțimea geometrică și înălțimea manometrică de pompare;

η_m — randamentul mecanic (0,6—0,9).

Randamentul total are valoarea 0,7—0,9 pentru pompele cu piston și 0,6—0,8 pentru pompele centrifuge; pentru instalații mari de pompare, se ating valori între 0,93 și 0,95.

Puterea pompelor. Puterea utilă reprezintă produsul dintre energia specifică $W = Z \cdot g$ și debitul masic al pompei:

$$N_u = Q_m \cdot Z \cdot g = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot Z = Q_v \Delta p_t \tag{88}$$

în care:

Z este înălțimea manometrică de pompare, în m, calculată cu ecuația (85);

N_u — puterea pompei, în W;

ρ — densitatea lichidului, în kg/m³.

Δp_t reprezintă presiunea totală dezvoltată de pompă, calculată tot cu ecuația (85), înmulțită însă cu produsul $\rho \cdot g$,

$$\Delta p_t = \Delta p_g + \Delta p_p + \Delta p_d + \Delta p_f, \tag{89}$$

în care:

$\Delta p_g = Z_g \cdot \rho \cdot g$ reprezintă presiunea hidrostatică corespunzătoare înălțimii geometrice;

Δp_p — diferența de presiune dintre aspirație și refulare;

$\Delta p_d = \frac{w^2 \cdot p}{2}$ — presiunea dinamică;

Δp_f — pierderea de presiune datorită frecărilor, calculate cu ecuația lui Fanning. Puterea N consumată de pompă se calculează ținîndu-se seama de randamente, cu ajutorul relațiilor:

$$N = \frac{Q_v \cdot \Delta p_t}{\eta_v \cdot \eta_m} = \frac{Q_v \cdot \Delta p_g}{\eta_t}. \tag{90}$$

Pentru a se obține puterea exprimată în kW, valorile obținute cu ajutorul relațiilor (90) se împart cu 1 000.

Scanned with OKEN Scanner

2) Dispozitive de pompare fără elemente mobile

Pentru a se asigura transportul lichidelor, se folosesc dispozitive care utilizează fie energia potențială a lichidului de transportat (sifonul), fie energia unui fluid motor (montejusul, injectorul, pompa Mammut).

Montejusul. Este un dispozitiv care servește la ridicarea lichidelor, în special a lichidelor corosive, utilizînd energia unui gaz comprimat, de obicei aer. El constă dintr-un recipient prevăzut cu conducte pentru alimentarea cu lichidul de ridicat, pentru intrarea gazului comprimat și pentru ieșirea lichidului.

Pompa Mammut (fig. 81). Servește la ridicarea lichidelor, a suspensiilor lichid-solid și chiar a lichidelor conținînd solide cu dimensiuni mari, cu ajutorul aerului comprimat. Funcționarea sa se bazează pe formarea unei suspensii gaz-lichid în conducta de ridicare, care avînd densitatea mai mică decît a lichidului ca atare se ridică conform principiului vaselor comunicante.

Aerul comprimat necesar pompării este adus cu ajutorul unei conducte, în partea inferioară, puțin lărgită, a conductei de ridicare, unde se formează suspensia gaz-lichid; conducta de ridicare este confundată pe o porțiune Z_s în lichidul de pompat. Înălțimea de pompare se calculează cu relația:

$$Z_p = Z_s \frac{\rho_l - \rho_s}{\rho_s}. \qquad (91)$$

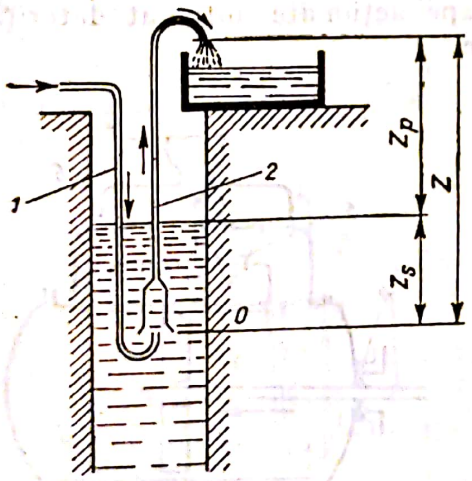


Fig. 81. Schema de principiu a pompei Mammut:
1 — conductă de aer comprimat; 2 — conductă de ridicare.

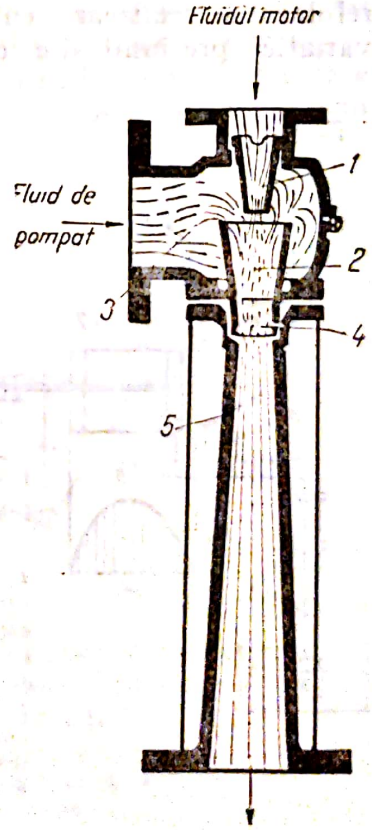


Fig. 82. Injector:
1 — duză de intrare; 2 — ajutajul de amestec; 3 — cameră de aspirație; 4 — gîtul injectorului; 5 — difuzor.

Scanned with OKEN Scanner

Injectoarele și ejectoarele, numite și pompe cu jet de fluid, servesc la transportul fluidelor utilizînd energia cinetică a unui fluid motor (abur, apă, aer comprimat) pe care o furnizează fluidul pompat sub formă de energie potențială de presiune.

Injectoarele se folosesc pentru transportul și pomparea lichidului într-un recipient sub presiune, pe cînd ejectoarele folosesc la evacuarea lichidului dintr-un recipient oarecare.

Într-un injector (fig. 82), fluidul motor intră printr-o duză, cu energie cinetică mare, străbătînd cu viteză ajutajul de amestec. Datorită vitezei mari pe care o are fluidul motor la intrarea în ajutajul de amestec, în camera de aspirație se produce o scădere a presiunii (în ecuația lui Bernoulli, suma energiilor fiind constantă, creșterea energiei cinetice produce o scădere a energiei potențiale de presiune), care are ca efect aspirația (antrenarea) fluidului ce urmează a fi pompat. În ajutajul de amestec, energiile celor două fluide se omogenizează, apoi, în difuzorul injectorului, datorită măririi continue a secțiunii de curgere, energia cinetică este transformată în energie de presiune.

3) Pompe cu mișcări alternative

Principiul de funcționare al pompelor din această categorie se bazează pe variația volumului camerei de pompare datorită mișcării alternative a unui piston, plunger sau membrană; mărirea volumului camerei de pompare provoacă aspirarea lichidului în pompă, iar micșorarea acestuia, refularea lichidului din pompă. Închiderea sau deschiderea conductelor de aspirare și refulare se realizează cu ajutorul unor supape acționate automat datorită variației presiunii din camera de pompare.

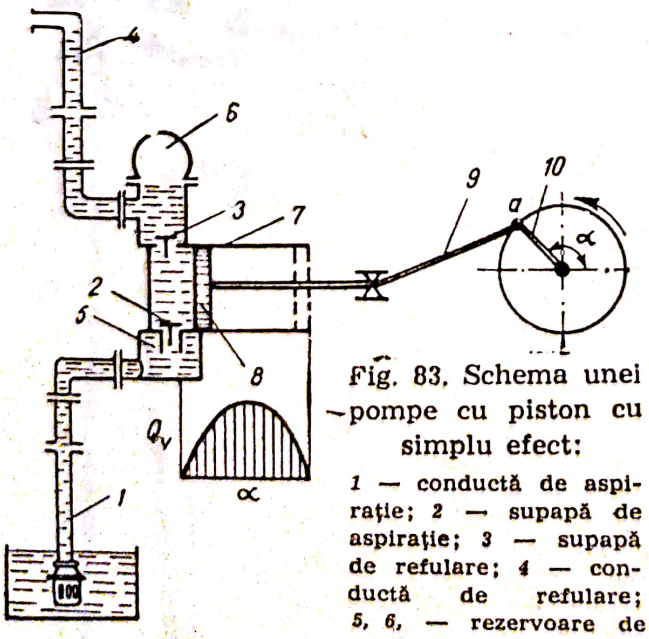


Fig. 83. Schema unei pompe cu piston cu simplu efect:

1 — conductă de aspirație; *2* — supapă de aspirație; *3* — supapă de refulare; *4* — conductă de refulare; *5, 6,* — rezervoare de amortizare; *7* — cilindru; *8* — piston; *9* — bielă; *10* — manivelă.

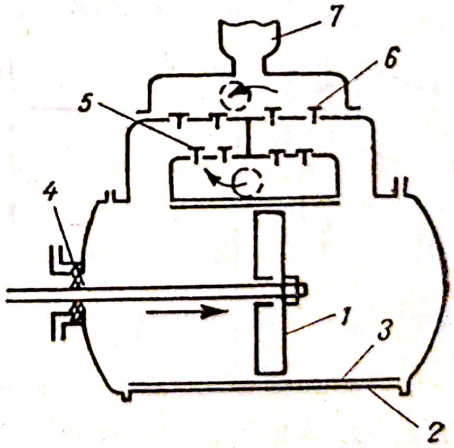


Fig. 84. Schema unei pompe cu dublu efect:

1 — piston; *2* — cilindrul pompei; *3* — cămașa cilindrului; *4* — presetupă; *5* — supape de aspirație; *6* — supape de refulare; *7* — vas de amortizare.

Scanned with OKEN Scanner

Pompe cu piston. La aceste pompe, aspirația și refularea lichidului sînt rezultatul deplasării rectilinii a unui piston în cilindrul de pompare (fig. 83). O pompă care are numai o față a pistonului activă, adică refulează lichid numai într-o singură cursă, se numește *pompă cu simplu efect*; pompele care au active ambele fețe ale pistonului (aspiră și refulează în ambele curse) se numesc *pompe cu dublu efect.*

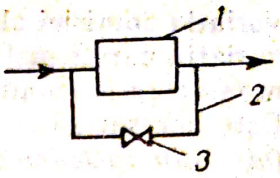


Fig. 85. Principiul reglării debitului prin conducta de ocolire:

1 — pompă cu piston; *2* — conductă de ocolire; *3* — ventil.

După cum se observă în figură, de la axul motor mișcarea este transmisă pistonului prin intermediul mecanismului bielă-manivelă, care transformă, în același timp, rotația uniformă a axului în mișcare alternativă a pistonului cu viteză neuniformă.

Debitul momentan al pompelor cu piston nu este constant, ci pulsator și întrerupt, variind după o sinusoidă, așa cum rezultă din figura 83.

Atît pentru uniformizarea debitului, cît și pentru echilibrarea arborelui, se utilizează pompele duplex sau triplex, la care pistoanele se montează pe același arbore însă decalat cu 180° sau 120°, după cum sînt două pompe (duplex) sau trei (triplex). Pentru atenuarea pulsațiilor debitului, pe conductele de aspirație și refulare se montează așa-numitele *vase de amortizare* sau *camere pneumatice*, al căror volum este umplut parțial cu aer; acesta joacă rolul unei perne amortizoare care, prin comprimare sau destindere, înmagazinează sau cedează o parte din lichidul debitat de pompă.

În figura 84 este reprezentată schița unei pompe cu dublu efect. Pentru a asigura etanșeitatea interioară între piston și cilindrul pompei, pistonul este construit din două discuri între care, marginal, se montează garnituri de etanșeitate; în exterior, etanșeitatea este asigurată de o presetupă.

Reglarea debitului pompelor cu piston. Pompele cu piston pot fi acționate de un cilindru cu abur sau de un motor electric. Debitul se poate regla prin

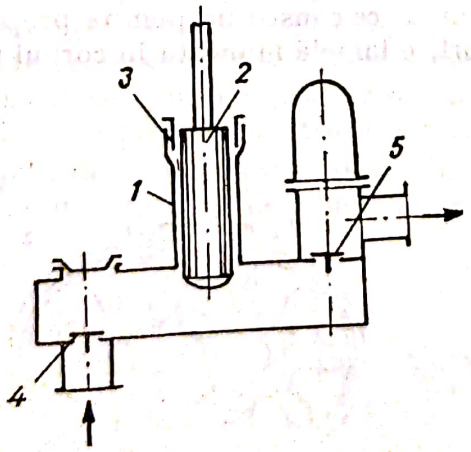


Fig. 86. Schema unei pompe verticale cu plunger:

1 — cilindru; *2* — plunger; *3* — presetupă; *4* — supapă de aspirație; *5* — supapă de refulare.

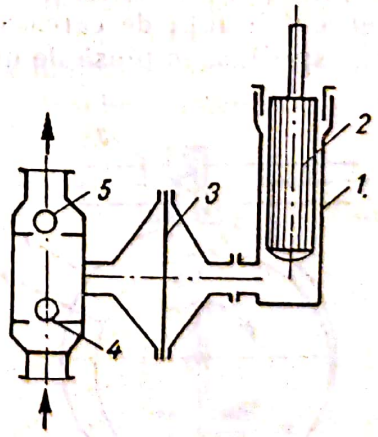


Fig. 87. Schema de principiu a pompei cu membrană:

1 — cilindru; *2* — plunger; *3* — membrană; *4*, *5* — supape.

Scanned with OKEN Scanner

variaţia admisiei aburului în cilindru, prin variaţia turaţiei motorului sau prin variaţia cursei pistonului. O metodă des folosită este deschiderea unui ventil montat pe o conductă de ocolire (by-pass) cum este schiţat în figura 85. Este necesar să se reţină că *reglarea debitului pompelor cu piston nu se poate face prin închiderea unui ventil montat prin conducta de refulare, deoarece ar duce la explozia pompei.*

Pompele cu plunger. Aceste pompe (fig. 86) sînt asemănătoare din punct de vedere constructiv şi funcţional cu pompele cu piston, deosebirea constînd din înlocuirea pistonului printr-un corp cilindric de volum relativ mare, numit plunger, evitîndu-se etanşarea interioară; lipsa etanşării interioare face posibilă utilizarea acestor pompe pentru lichide care conţin solide în suspensie. Pompele cu plunger realizează presiuni mai mari decît pompele cu piston şi se utilizează pentru pomparea lichidelor murdare sau cu viscozitate mare.

Pompe cu membrană. Se folosesc la pomparea suspensiilor şi a lichidelor corosive. Cilindrul pompei şi pistonul sau plungerul sînt separate de lichidul de pompat printr-o membrană (diafragmă) elastică din material plastic sau din oţel special. La pompa cu membrană din figura 87, prin ridicarea plungerului în sus, membrana se deformează spre dreapta şi lichidul este aspirat în pompă. La cursa de întoarcere, membrana se deformează spre stînga, refulînd lichidul din pompă.

4) Dispozitive rotative

La pompele din această categorie, efectul de pompare rezultă atît din variaţia volumului camerei de pompare cît şi din deplasarea, la volum constant, a lichidului, cu ajutorul unor piese de formă corespunzătoare (tambur excentric, roţi dinţate, pistoane rotative), care se rotesc etanş între ele şi faţă de peretele camerei de pompare; la aceste pompe lipsesc supapele.

Pompe cu rotor excentric (fig. 88). Variaţia volumului spaţiilor de aspiraţie şi de pompare şi transportul lichidului prin pompă sînt asigurate de un rotor montat excentric faţă de carcasa cilindrică ce constituie pompa propriu-zisă. Pe rotor se sprijină, împinsă de un resort, o lamelă montată în corpul pompei.

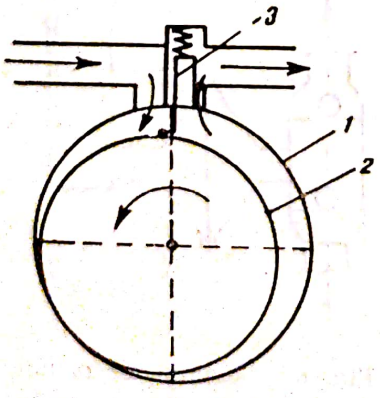


Fig. 88. Pompa cu tambur excentric:
1 — carcasă cilindrică; 2 — rotor excentric; 3 — lamelă.

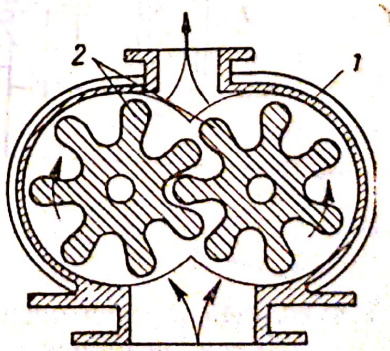


Fig. 89. Pompă cu roţi dinţate:
1 — corpul pompei; 2 — roţi dinţate.

Scanned with OKEN Scanner

care separă etanş spaţiul de refulare de spaţiul de aspiraţie. Datorită poziţiei sale, rotorul, în urma rotirii, aspiră, transportă şi refulează fluidul prin variaţia spaţiilor de aspiraţie şi refulare. Aceste pompe se folosesc pentru pomparea lichidelor calde vîscoase, sau ca pompe de ungere.

Pompe cu roţi dinţate (fig. 89). La aceste pompe, lichidul de pompat este transportat, de la conducta de aspiraţie către cea de refulare, de către două rotoare cilindrice dinţate, în spaţiile formate de doi dinţi consecutivi şi de peretele camerei de pompare. Pot fi folosite pentru pomparea lichidelor calde vîscoase, a suspensiilor, precum şi a lichidelor corosive.

Dispozitivele rotative sînt sigure în funcţionare, avînd debit constant, independent de presiune. Lipsa supapelor şi construcţia simplă influenţează favorabil costul acestor pompe. Ca şi la pompele cu piston, reglarea debitului se face printr-o conductă de ocolire cu robinet (by-pass) sau prin variaţia turaţiei motorului de acţionare. Sînt indicate pentru pomparea lichidelor cu viscozitate mare.

5) Pompe centrifuge

La aceste tipuri de pompe, pomparea rezultă în urma accelerării lichidului într-un cîmp centrifug creat în interiorul carcasei pompei; în carcasa pompei, de formă corespunzătoare, energia cinetică a lichidului este transformată în energie potenţială de presiune.

Principiul de funcţionare al unei pompe centrifuge rezultă din schiţa reprezentată în figura 90. Crearea cîmpului de forţe centrifug se realizează prin rotirea, cu turaţie mare, a unui rotor cu palete, în interiorul carcasei prevăzută cu un canal marginal colector în formă de melc; canalul colector se lărgeşte continuu către conducta de refulare, pentru a putea colecta lichidul debitat de rotorul cu palete. Conducta de aspiraţie este racordată axial la carcasa pompei, iar conducta de refulare este racordată la canalul colector. Rotorul poate fi deschis sau închis. Rotorul deschis constă dintr-un disc mic pe care sînt dispuse paletele, iar rotorul închis este format din două discuri între care sînt fixate paletele pe toată lungimea lor; unul dintre discuri este fixat pe axul pompei, iar celălalt are o deschidere centrală în dreptul conductei de aspiraţie, pentru intrarea lichidului.

Lichidul de pompat este aspirat în rotor prin conducta axială, este accelerat continuu, viteza şi deci energia sa cinetică crescînd pe parcursul cana-

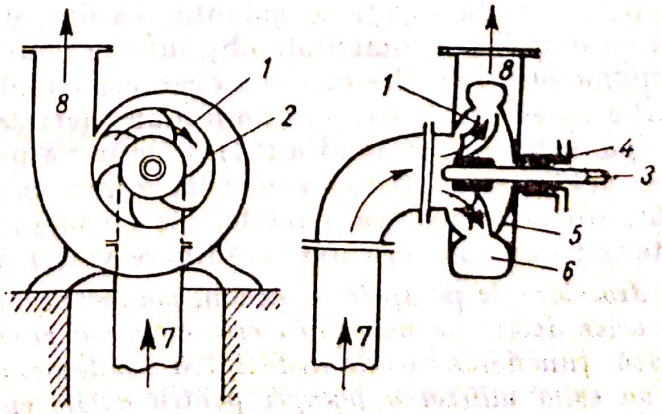


Fig. 90. Pompă centrifugă:
1 — rotor; *2* — paletele rotorului; *3* — arbore; *4* — presetupă; *5* — carcasă; *6* — canal colector; *7* — conductă de aspiraţie; *8* — conductă de refulare.

Scanned with OKEN Scanner

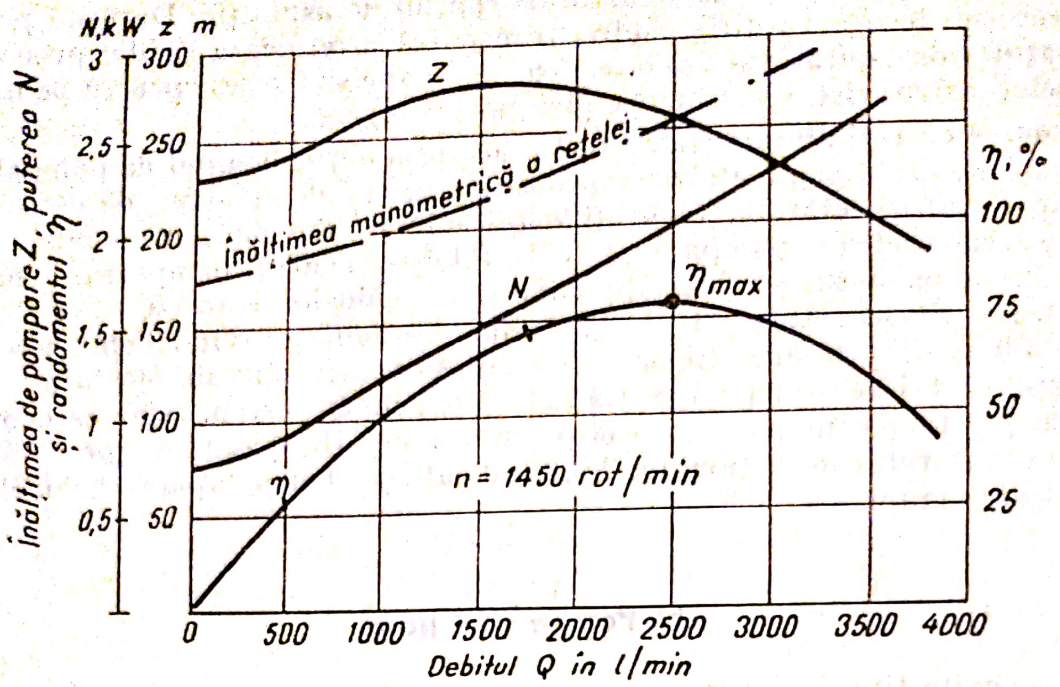


Fig. 91. Diagrama caracteristicilor de funcționare.

lelor dintre paletele rotorului. La ieșirea din rotor, lichidul intră în secțiunea mai largă a canalului colector, viteza sa scade, energia cinetică fiind transformată în energie de presiune; lichidul este refulat tangențial. *Debitul pompei centrifuge este continuu, fără intermitențe sau pulsații.*

Deoarece principiul de funcționare nu presupune separarea etanșă a spațiilor de aspirație de refulare, pompa nu este prevăzută cu supape; pompa este prevăzută numai cu etanșare exterioară, printr-o cutie de etanșare (presetupă) între axul rotorului și carcasa pompei. De aceea *datorită acestui principiu de funcționare* **pompa centrifugă nu funcționează decît dacă este plină cu lichid, adică este amorsată.**

Caracteristicile pompelor centrifuge. Pompele centrifuge se caracterizează prin debitul Q, înălțimea manometrică (presiunea dezvoltată), Z turația n, randamentul η și puterea consumată N.

Încercarea unei pompe pe bancul de probă, funcție de turația motorului, permite determinarea practică a variației mărimilor Q, n, Z și N. Pentru alegerea pompelor centrifuge, mult mai interesantă este încercarea pompelor la bancul de probă la turație constantă, variind debitul pompei. Diagrama construită cu datele experimentale obținute se numește *diagrama caracteristicilor de funcționare* (fig. 91). Pe diagrama caracteristicilor de funcționare este trasată și curba corespunzătoare înălțimii manometrice a rețelei în care funcționează pompa, calculată cu relația (84). Pompa va putea să funcționeze numai în regiunea debitului pentru care înălțimea manometrică a pompei este superioară înălțimii manometrice a rețelei. Se recomandă să se lucreze cu valori ale caracteristicilor pompei corespunzătoare valorii maxime a randamentului.

Spre deosebire de pompele cu piston, pompele centrifuge nu au o funcționare stabilă la orice debit: pe porțiunea crescătoare a curbei, reprezentînd înălțimea manometrică, funcționarea este instabilă și randamentul foarte mic. Din această cauză se va evita utilizarea pompei pentru debite cuprinse în acest interval.

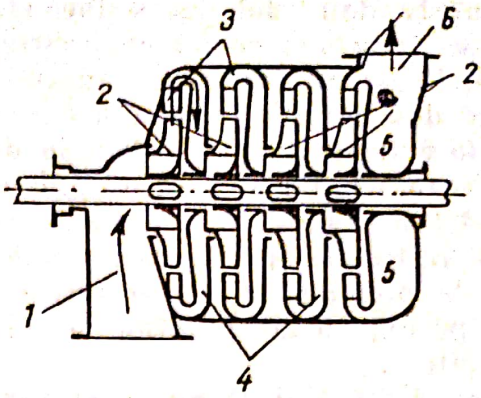


Fig. 92. Schița unei pompe centrifuge cu mai multe etaje:

1 — racordul de aspirație; *2* — rotoare; *3* — statoare; *4* — canale de conducere a lichidului; *5* — carcasa de colectare a ultimei trepte; *6* — racordul de refulare.

Tipuri de pompe centrifuge. Pentru clasificarea pompelor se pot utiliza diferite criterii, ajungîndu-se la o mare varietate de categorii și tipuri constructive.

După înălțimea de pompare, se deosebesc *pompe centrifuge de joasă și de înaltă presiune.* Pompele de joasă presiune au înălțimea de pompare pînă la 20 m. Se folosesc, în general, ca pompe de evacuare și oriunde sînt necesare debite mari la presiune mică.

După numărul de trepte (etaje), pompele se clasifică în *pompe centrifuge cu un singur etaj* (v. fig. 90) care au un singur rotor pe ax și în *pompe centrifuge cu mai multe etaje.*

Pompele cu mai multe etaje (fig. 92) au mai multe rotoare, montate pe același ax; lichidul trece prin primul rotor, este colectat de către carcasa primei trepte și este dirijat prin canalele de conducere către centrul rotorului următor, operația repetîndu-se în continuare.

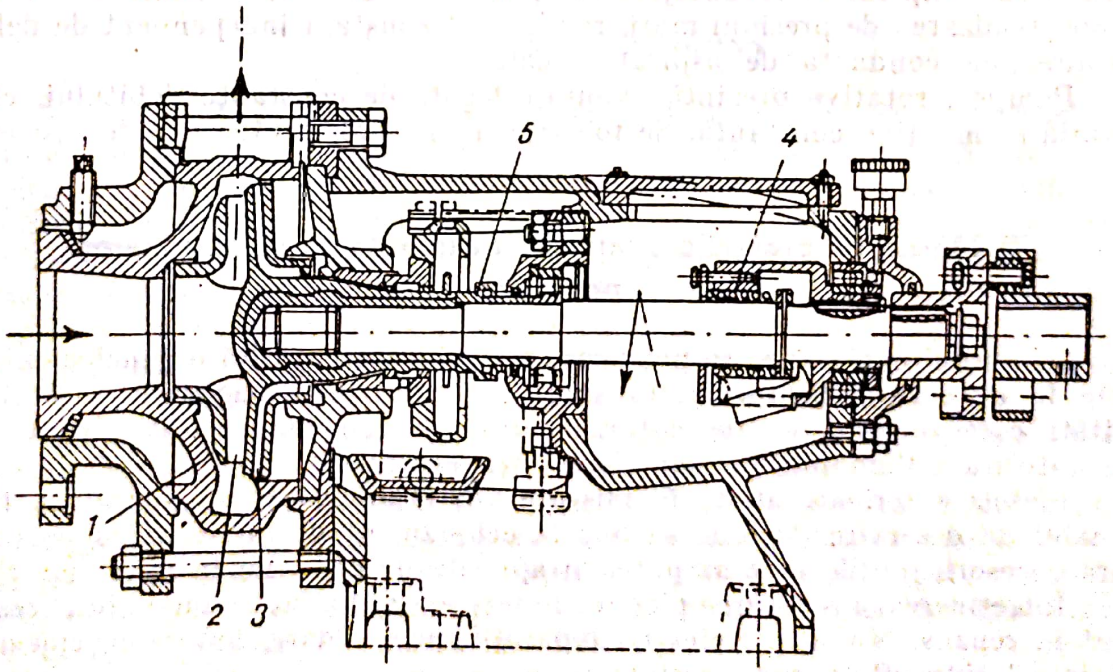


Fig. 93. Pompa centrifugă fără cutia de etanșare:

1 — carcasă; *2* — rotor; *3* — palete dorsale; *4* — arc; *5* — bucșă.

În funcție de modul cum se face etanșarea între axul rotorului și carcasa pompei, se deosebesc *pompe cu presetupă* (cutie de etanșare) și *pompe fără presetupă*. Deoarece cutiile de etanșare produc dificultăți în funcționarea lor, necesitînd dese revizii și ajustări, s-a căutat realizarea unor construcții care să ducă la evitarea lor. Construcția din figura 93 reprezintă o pompă fără cutie de etanșare. La această pompă scurgerea lichidului între ax și carcasă în timpul funcționării este împiedicată de niște palete montate în spatele rotorului. În timpul opririi, etanșarea este asigurată de niște suprafețe conice formate de prelungirile bucșei rotorului și ale unei bucșe din fluoroplast montată pe ax; un arc puternic asigură contactul între cele două suprafețe bine șlefuite.

Datorită faptului că nu au etanșare interioară, pompele centrifuge pot fi construite din diferite materiale antiacide. Cînd corpul este construit din materiale cu rezistență mecanică mai mică (ceramică, sticlă, materiale plastice) se încadrează într-o carcasă din oțel.

6) Comparație între categoriile de pompe pentru lichide

Dintre categoriile de pompe descrise, cea mai largă răspîndire în industria chimică și petrochimică o au pompele centrifuge, datorită multiplelor avantaje pe care le au. Dintre acestea, mai importante sînt: debit uniform, fără pulsații; turație mare (posibilitatea cuplării directe); simplitatea construcției; preț de cost redus; reglarea ușoară a debitului prin închiderea sau deschiderea unui ventil pe conducta de refulare; posibilitatea pompării lichidelor murdare; fundații reduse etc.

Pompele cu piston se utilizează pentru pomparea unor debite mici de lichid la presiuni mari, precum și pentru pomparea lichidelor vîscoase, inflamabile sau explozive. Avantajele lor principale sînt: elasticitate în funcționare, realizarea de presiuni mari, randament constant independent de debit, pornirea cu conducta de aspirație goală.

Pompele rotative prezintă avantaje legate de constanța debitului, cînd turația se menține constantă. Se folosesc, în special, pentru lichide vîscoase.

7) Măsuri de protecție a muncii la exploatarea și întreținerea pompelor

În timpul exploatării se pot produce accidente datorită organelor exterioare în mișcare și lichidelor transportate, în cazul neasigurării unei etan, șeități corespunzătoare (fie datorită presiunii sau temperaturii lichidului. fie datorită inflamabilității sau nocivității acestuia).

Piesele exterioare aflate în mișcare vor fi prevăzute cu apărători. Personalul de deservire, trebuie să poarte echipament de lucru strîns pe corp, fără accesorii inutile care ar putea fi apucate de organele în mișcare.

Întreținerea și repararea pieselor în mișcare se va face numai cînd acestea sînt în repaus. Nu se vor efectua reparații (prin sudare, batere cu ciocanul) la instalațiile aflate sub presiune.

La pomparea lichidelor nocive (care pot provoca leziuni ale căilor respiratorii, ale pielii, distrugerea îmbrăcămintii, otrăviri, intoxicații etc.) perso-

Scanned with OKEN Scanner

nalul de deservire trebuie să poarte echipament corespunzător (ochelari, măşti, îmbrăcăminte din cauciuc, cizme etc., după caz) şi să respecte normele de protecţie a muncii specifice locului de muncă.

La pomparea lichidelor inflamabile este interzis fumatul, lucrul cu aparatele de sudură cu flacără, cu scule care pot provoca scîntei; încălţămintea nu va fi prevăzută cu blacheuri din oţel, deoarece acestea pot provoca scîntei la atingerea de părţi metalice ale instalaţiei. Personalul de deservire a instalaţiilor în care se află lichide inflamabile trebuie să ştie să mînuiască extinctoarele cu CO_2 etc.

b. Transportul şi comprimarea gazelor.

Pompe pentru gaze

Pompele utilizate pentru transportul şi comprimarea gazelor poartă numele de **compresoare.** Utilajele cu ajutorul cărora se realizează şi se menţine vid într-o incintă sau instalaţie se numesc **pompe de vid.**

Pompele pentru gaze se clasifică după aceleaşi principii ca şi pompele pentru lichide:

— dispozitive fără elemente mobile;
— compresoare cu mişcări alternative;
— dispozitive rotative (numite şi suflante);
— compresoare centrifuge.

Compresoarele cu mişcări alternative (cu piston) şi suflantele (dispozitive rotative), datorită caracterului volumic al produsului de comprimare se numesc *compresoare volumice.*

1) Compresoare cu piston

Principiul de funcţionare al acestora este identic cu cel al pompelor cu piston: aspiraţia şi comprimarea gazului este efectul variaţiei volumului cilindrului compresorului, datorită mişcărilor alternative ale pistonului. Diferenţierile în funcţionarea compresorului cu piston (închiderea şi deschiderea supapelor, necesitatea răcirii), apar datorită efectului de compresibilitate a gazelor. Astfel, după cum rezultă din diagrama teoretică a unui compresor cu piston (fig. 94, *a*), după aspiraţie, la cursa de întoarcere, presiunea gazului nu creşte brusc ca la lichide, ci treptat, supapa de refulare deschizîndu-se numai cînd presiunea în cilindru a atins presiunea de refulare p_2.

Raportul dintre presiunea finală (de refulare) p_a şi presiunea iniţială se numeşte grad de comprimare şi se notează cu Z.

Energia necesară comprimării gazului. Pentru un ciclu de comprimare în compresorul cu piston, energia necesară reprezintă suma energiilor celor trei faze: **aspiraţie, comprimare** şi **refulare;** ponderea principală o are însă energia necesară comprimării gazului. Valoarea energiei corespunzătoare acestei faze depinde de natura comprimării.

Din punct de vedere teoretic comprimarea poate fi **izotermă** (menţinerea gazului la temperatură constantă prin răcirea perfectă a cilindrului) şi **adiabatică** (izolarea ideală a cilindrului pentru a nu permite schimbul de căldură

Scanned with OKEN Scanner

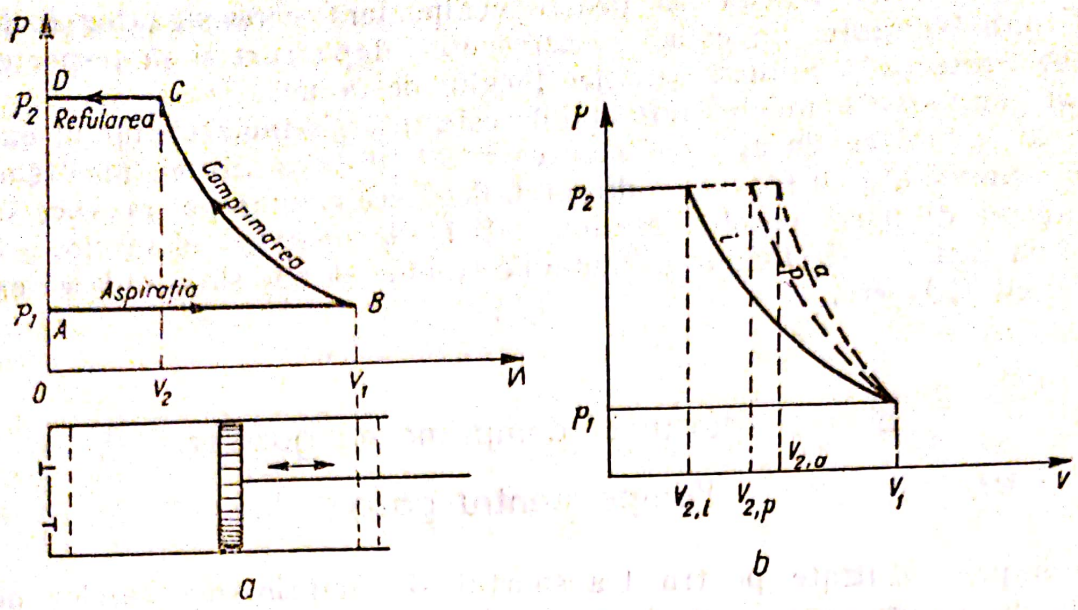


Fig. 94. Diagrama teoretică a compresorului cu piston (*a*) și modul de comprimare a gazelor (*b*):

i — izotermă; *p* — politropică; *a* — adiabatică.

cu exteriorul). În practică se realizează comprimarea după o curbă intermediară între cele două limite teoretice, numită **politropică.** Așa cum rezultă din diagrama din figura 94, *b*, comprimarea politropică este reprezentată printr-o curbă destul de apropiată de comprimarea adiabatică; de aceea, uneori comprimarea politropică se aproximează printr-o comprimare adiabatică.

În funcție de natura comprimării, volumele finale, pentru aceeași presiune p_2, au valori diferite, crescînd în ordinea: $V_{2i} < V_{2p} < V_{2a}$, ca și energia necesară comprimării gazului: $L_i < L_p < L_a$.

Diagrama reală a unui compresor cu piston (fig. 95) diferă de cea teoretică, datorită faptului că lungimea cursei pistonului este mai mică decît lungimea cilindrului, pentru a evita efectele dilatării acestor piese. Spațiul rezultat din această diferență se numește *spațiu mort* sau *spațiu vătămător* și se notează cu V_0.

După terminarea cursei de refulare, la întoarcerea pistonului spre dreapta, gazul care se găsește în spațiul mort, la presiunea de refulare p_2, se va destinde, aspirația începînd numai după ce presiunea în cilindru a scăzut sub valoarea presiunii de aspirație p_1.

Pentru ca supapa de aspirație să se deschidă este necesar ca presiunea în cilindru să scadă pînă cînd diferența de presiune δ_{p1} dintre cele două fețe ale supapei poate să învingă rezistențele și inerția supapei; în continuarea cursei de aspirație, această diferență de presiune scade la valoarea necesară învingerii forțelor de frecare. Același fenomen are loc și la deschiderea supapei de refulare, presiunea în cilindru fiind mai mare decît presiunea în conducta de refulare.

Comprimarea în trepte. Presiunea de refulare a unui compresor nu poate fi prea mare, deoarece procesul real de comprimare decurgînd după o curbă politropică, odată cu creșterea presiunii crește și temperatura gazului. Creșterea temperaturii gazului duce la degradarea uleiurilor de ungere a pieselor mobile ale compresorului și uneori chiar la explozie.

Scanned with OKEN Scanner

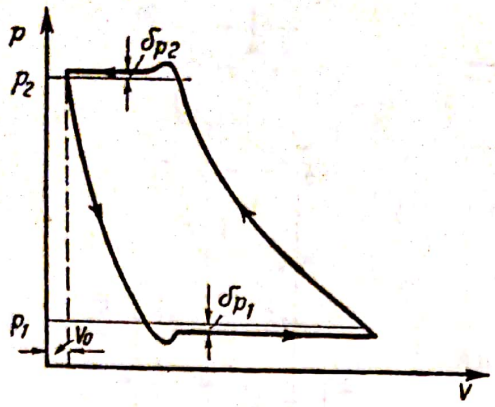


Fig. 95. Diagrama reală a unui compresor cu piston.

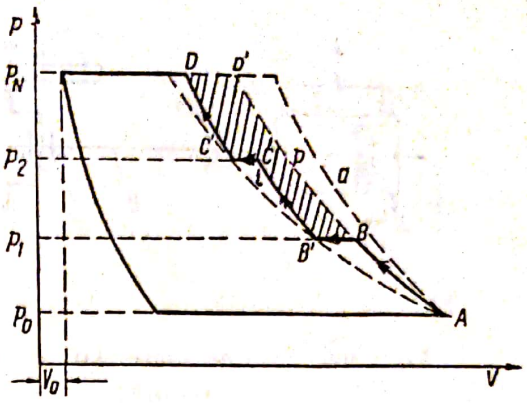


Fig. 96. Comprimarea în trepte.

Din practică s-a stabilit că temperatura finală nu trebuie să depăşească 200°C, ceea ce ar corespunde unui grad de comprimare $Z=4{,}8$ pentru aer şi $Z=6{,}2$ pentru gaze de sondă; uneori condiţiile de lucru impun temperaturi finale mai mici, astfel încît se lucrează cu un raport de comprimare Z cuprins între 3 şi 4. Realizarea de presiuni mari, respectînd în acelaşi timp cerinţele tehnologice şi economice, se obţine prin comprimarea în trepte. În figura 96 este reprezentată comprimarea într-un compresor cu trei trepte. După fiecare treaptă, în care comprimarea are loc după o politropică, gazul este scos din cilindrul compresorului şi răcit izobar (la presiune constantă) într-un răcitor, pînă la izoterma corespunzătoare punctului iniţial. Din figură se observă că are loc şi o economie de lucru mecanic proporţională cu suprafaţa haşurată $BB'CDD'$. La comprimarea în trepte, presiunile intermediare între trepte se aleg astfel încît lucrul mecanic economisit să fie maxim. Pentru un compresor cu două trepte, această condiţie este îndeplinită cînd presiunea intermediară p_x reprezintă media geometrică a presiunilor iniţială p_0 şi finală p_2:

$$p_x=\sqrt{p_0 \cdot p_2} \tag{92}$$

Pentru un compresor cu N trepte, avînd gradul de comprimare Z constant în fiecare treaptă, relaţia (92) poate fi generalizată sub forma:

$$\log Z=\frac{\log \frac{p_N}{p_0}}{N}. \tag{93}$$

Tipuri de compresoare cu piston. În figura 97, *a* este reprezentată schema unui compresor orizontal cu dublu efect; gazul este comprimat în ambele curse ale pistonului şi de aceea cilindrul este prevăzut cu două rînduri de supape. Uneori corpul cilindrului şi capacul cilindrului sînt răcite prin manta de apă. În figura 97, *b* este reprezentată schema unui compresor cu doi cilindri. În aceste construcţii, mişcarea alternativă a pistonului este realizată cu ajutorul unui singur arbore cotit; cele două pistoane sînt decalate cu 90 sau 180°.

Compresoarele cu mai multe trepte (sau etaje) se construiesc de obicei cu cilindri în serie; în acest caz, pistoanele respective formează o singură piesă.

Scanned with OKEN Scanner

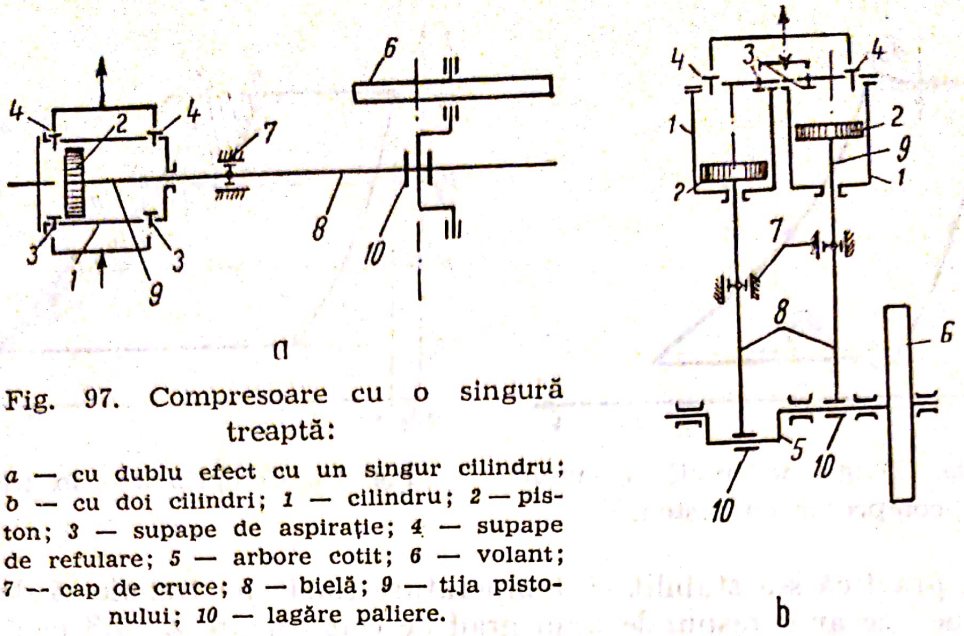


Fig. 97. Compresoare cu o singură treaptă:

a — cu dublu efect cu un singur cilindru; *b* — cu doi cilindri; *1* — cilindru; *2* — piston; *3* — supape de aspirație; *4* — supape de refulare; *5* — arbore cotit; *6* — volant; *7* — cap de cruce; *8* — bielă; *9* — tija pistonului; *10* — lagăre paliere.

Această construcție înlătură o parte din presetupele care trebuie montate pe capacele cilindrilor.

Reglarea debitului compresoarelor cu piston se realizează pe următoarele căi: variația spațiului mort, prin intercalarea unui spațiu suplimentar exterior; *deschiderea parțială a supapelor de aspirație; închiderea parțială a conductei de aspirație*, prin închiderea unui ventil montat pe o conductă de ocolire (by-pass).

La compresoarele acționate de un motor electric, reglarea debitului se poate realiza printr-un dispozitiv automat care oprește motorul cînd presiunea din rezervorul tampon a atins valoarea prescrisă; acest mod de reglare este denumit *totul* sau *nimic*.

2) Dispozitive rotative

Pompele pentru gaze din această categorie, numite și compresoare volumice, sînt caracterizate prin mișcarea de rotație a unui piston (rotor), de construcție corespunzătoare, față de cilindrul de comprimare respectiv; prin eliminarea sistemului bielă-manivelă, acestea sînt mult mai bine echilibrate dinamic.

Suflantă cu lamele culisante în rotor. Se caracterizează printr-un rotor montat excentric într-o carcasă cilindrică, astfel încît între rotor, care are rol de piston rotativ, și carcasă — camera de comprimare — rămîne un spațiu cu secțiunea în formă de semilună (fig. 98). În rotor sînt prevăzute șanțuri radiale în care pot culisa lamele, care împart spațiul în formă de semilună în mai multe compartimente. Gazul este transportat și comprimat în compartimentele cu volum variabil (în creștere în partea de aspirație și în scădere în cea de refulare), delimitate de două lamele consecutive. Realizează presiuni de refulare de 5 at, într-o singură treaptă și de 15 at în două trepte.

Pompă cu inel lichid. La această construcție se evită frecarea lamelelor de peretele carcasei, prin formarea unui inel de lichid care asigură etanșarea

Scanned with OKEN Scanner

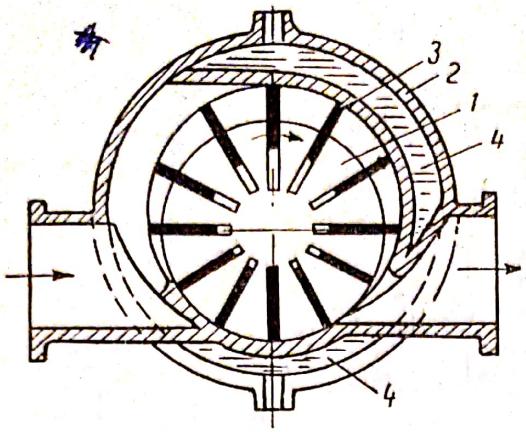


Fig. 98. Schema suflantei cu lamele culisante în rotor:

1 — rotor; *2* — carcasă; *3* — lamele culisante; *4* — manta cu apă.

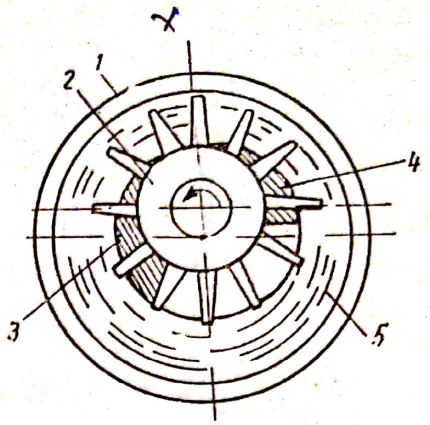


Fig. 99. Schema unei pompe cu inel lichid:

1 — carcasă; *2* — rotor cu lamele fixe; *3* — deschidere de aspirație; *4* — deschidere de refulare; *5* — inel de lichid.

spațiilor de comprimare și transport față de pereții carcasei. Construcția schițată în figura 99 constă dintr-un rotor prevăzut cu palete (lamele) radiale fixate rigid, plasat excentric într-o carcasă cilindrică. Înainte de pornirea pompei, în carcasă se introduce apă, care, ca urmare a mișcării rotorului, este împinsă de lamele la periferia rotorului, formînd un inel lichid. Datorită poziției excentrice a rotorului, spațiul neumplut cu lichid este împărțit de către lamelele fixate pe rotor în mai multe compartimente cu volum variabil, în care este transportat și comprimat gazul, aspirat și refulat prin niște deschideri practicate în pereții frontali ai carcasei.

Realizează presiuni de refulare mici (1—1,5 at); se utilizează mai mult ca pompe de vid sau cuplate cu rotoarele obișnuite ale pompelor centrifuge, la realizarea autoamorsării acestora.

Față de compresoarele cu piston, dispozitivele rotative au următoarele avantaje: dimensiuni reduse, turații mari, fundații reduse, debit continuu fără pulsații.

3) Compresoare centrifuge

Pompele centrifuge pentru gaze — **ventilatoarele și turbocompresoarele** — sînt construite pe același principiu ca și pompele respective pentru lichide. Diferențierile constructive, uneori funcționale, se datoresc proprietăților specifice ale gazelor (compresibilitate, densitate mică etc.). Constructiv ventilatoarele corespund pompelor centrifuge pentru lichide cu un singur etaj, iar turbocompresoarele — pompelor centrifuge cu mai multe etaje.

Ventilatoarele. Aceste dispozitive servesc pentru transportul gazelor la presiuni care, de obicei, nu depășesc 1 000 mm H_2O. Ridicarea presiunii gazului se realizează, ca și la pompele centrifuge, cu ajutorul unui rotor cu palete. Paletele rotoarelor ventilatoarelor pot fi plane (radiale) sau curbate în sens invers rotației rotorului; în ambele cazuri, paletele sînt mult mai

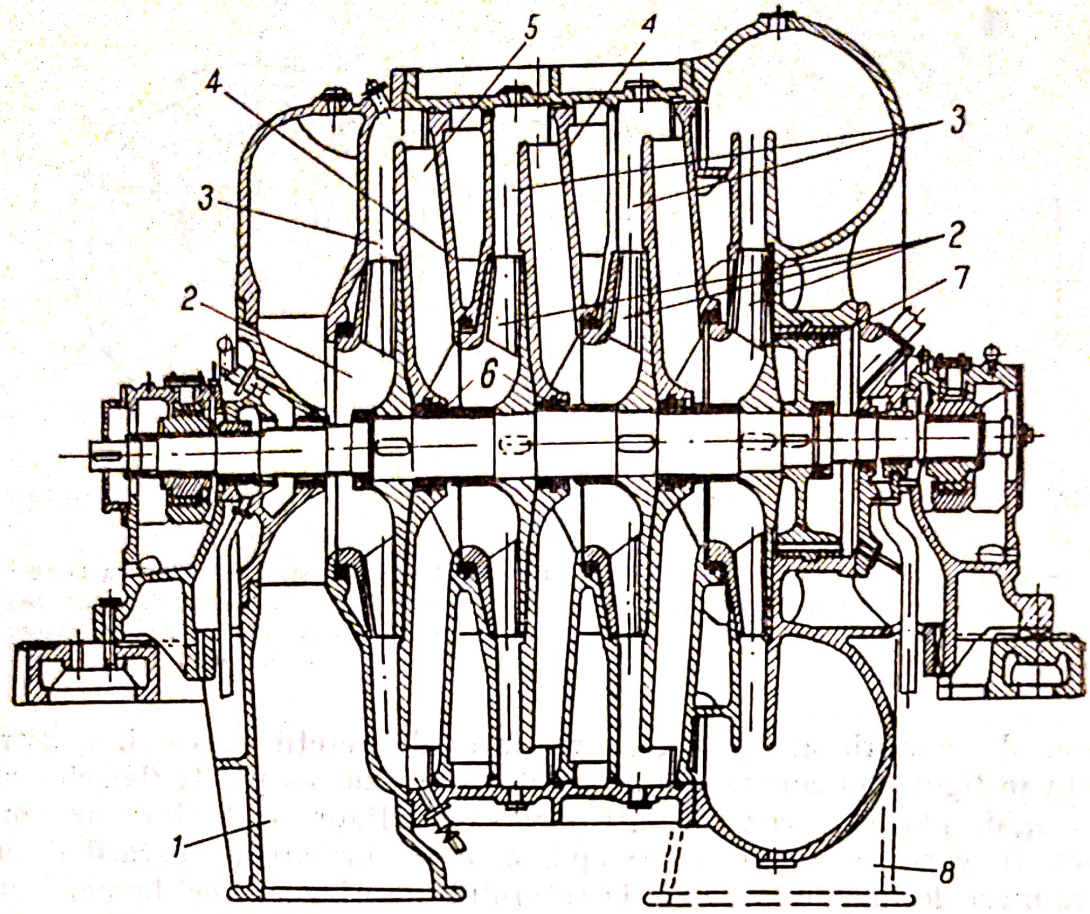


Fig. 100. Turbocompresor:

1 — conductă de aspirație; *2* — rotoare; *3* — statoare; *4* — diafragme; *5* — canale de dirijare a gazului; *6* — labirinți de etanșare; *7* — piston de descărcare; *8* — conductă de refulare.

late decît cele corespunzătoare pompelor centrifuge pentru lichide; rotoarele cu palete curbate se construiesc cu un număr mare de palete late.

Turbocompresoarele. Acestea au același principiu ca și ventilatoarele repetînd însă ridicarea presiunii gazului într-un număr mare de rotoare (trepte), montate pe același ax. În figura 100 este reprezentat un turbocompresor cu patru trepte. Gazul pătrunde prin conducta de aspirație în primul rotor cu palete, unde, datorită forței centrifuge, are loc o creștere a presiunii. La ieșirea din rotor, gazul este colectat de către stator și dirijat, cu ajutorul unor canale, către rotorul următor (a doua treaptă) unde operația se repetă; treptele sînt separate între ele prin diafragme de construcție specială. Presiunea axială rezultată din apăsarea gazului pe rotoarele turbocompresorului este echilibrată cu ajutorul unui piston de descărcare, montat pe ax, în partea de refulare.

Gradul de comprimare Z, realizat în turbocompresoare, este mai mic decît la compresoarele cu piston, avînd valori de 1,2—1,4. Din această cauză, la mașinile mici, răcirea gazului se realizează printr-o manta cu apă montată în interiorul carcasei; la mașinile mari, gazul este răcit după 3—6 trepte, în răcitoare exterioare.

Rotoarele turbocompresoarelor sînt montate pe același ax și au același diametru, lățimea lor însă descrește pe măsura comprimării gazului (micșo-

Scanned with OKEN Scanner

rarea volumului); se pot realiza și construcții în care atît diametrul cît și lățimea rotoarelor să se micșoreze pe măsură ce se apropie de conducta de refulare.

Turbocompresoarele au o serie de avantaje față de compresoarele cu piston, ceea ce explică extinderea lor rapidă din ultimul timp în industria chimică. *Dintre avantaje mai importante sînt:* lipsa pieselor ce se uzează prin frecare; fundații reduse; capacitatea nominală, presiunea și puterea — neschimbate pe toată durata de funcționare a compresorului; nu necesită ungere în spațiul de comprimare — deci gaze curate; cheltuieli reduse pentru înlocuirea pieselor uzate.

Datorită acestor avantaje, turbocompresoarele au pătruns în unele domenii rezervate exclusiv compresoarelor cu piston. Folosirea lor în industria amoniacului a permis reducerea investițiilor și a prețului de cost în această ramură importantă a industriei chimice.

b. Pompe de vid

Pompele de vid servesc pentru evacuarea gazului din anumite utilaje sau instalații, în care operațiile sau procesele care au loc necesită presiuni mici (subatmosferice).

Pentru realizarea presiunilor subatmosferice se utilizează dispozitive cunoscute sub numele de **pompe de vid.** Dintre acestea numai unele (majoritatea pompelor pentru gaze descrise pînă acum), reprezintă dispozitive care funcționează pe principiul ridicării presiunii gazului ca urmare a variației spațiului de pompare sau a energiei cinetice (pompele de vid propriu-zise). Alte dispozitive utilizate pentru realizarea vidului înaintat (pompe de difuziune, pompe moleculare, pompe ionice etc.) utilizează cu totul alte principii decît pomparea propriu-zisă.

1) Pompe de vid propriu-zise

Pentru realizarea de depresiuni de ordinul vidului parțial se pot utiliza compresoarele cu piston și dispozitivele rotative descrise la comprimarea gazelor. În acest caz ele sînt utilizate pentru partea de aspirație, gazul fiind comprimat la presiunea atmosferică. Pentru realizarea unor depresiuni absolute de 200 torr, se pot utiliza compresoarele cu piston obișnuite, ele funcționînd, în acest caz, cu un raport de comprimare $Z = \frac{760}{200} = 3{,}8$. Pentru presiuni absolute mai mici (depresiuni mai mari), randamentul de utilizare al acestora scade sub 50%, deoarece la rapoarte de comprimare mari ($Z=10$ pentru presiuni absolute de ordinul a 0,1 at) influența spațiului vătămător crește foarte mult. Pentru a remedia aceste neajunsuri, la pompele de vid cu piston se înlocuiesc supapele printr-un sertăraș rotativ, realizînd și egalizarea presiunilor la începutul fiecărei întoarceri a pistonului.

Pentru realizarea de depresiuni mai mari (vid mediu) se utilizează suflantele descrise la pompele pentru gaze. Dintre acestea, o utilizare mai mare o au pompele cu inel de lichid și pompele cu lamele culisante în rotor.

Scanned with OKEN Scanner

2) Ejectoare

Ejectoarele folosesc ca fluid motor aburul, care se îndepărtează din gazul evacuat prin condensare. Pentru realizarea de depresiuni mai mari se utilizează ejectoare cu mai multe trepte. În figura 101 este reprezentată schema unei instalații cu patru ejectoare. După fiecare ejector are loc condensarea aburului din amestecul abur-gaz format în ejector; condensarea se realizează prin răcire directă cu apă în condensatoare barometrice.

Pentru realizarea unor presiuni între 10^{-1} și 10^{-3} torr, se utilizează ejectoare cu vapori de mercur. Ejectoarele se montează în serie, iar condensarea vaporilor de mercur se realizează prin răcire, prin manta cu apă.

3) Alte tipuri de pompe de vid

Pentru realizarea vidului mediu sau a vidului înaintat se utilizează dispozitive care se bazează pe anumite proprietăți ale gazelor. *Pompele cu difuziune* folosesc principiul difuzării gazului care trebuie evacuat în circuitul vaporilor unor substanțe cu tensiuni foarte mici de vapori. Aceste pompe realizează presiuni absolute de ordinul $10^{-4}-10^{-5}$ torr.

Pompele moleculare folosesc principiul dirijării gazului de evacuat, ca urmare a ciocnirii moleculelor acestuia de un rotor neted care se rotește cu turație mare. În urma ciocnirilor elastice cu suprafața rotorului, moleculele se reflectă după legile reflexiei; șanțuri elicoidale prevăzute în carcasa pompei ghidează moleculele de gaz către evacuare.

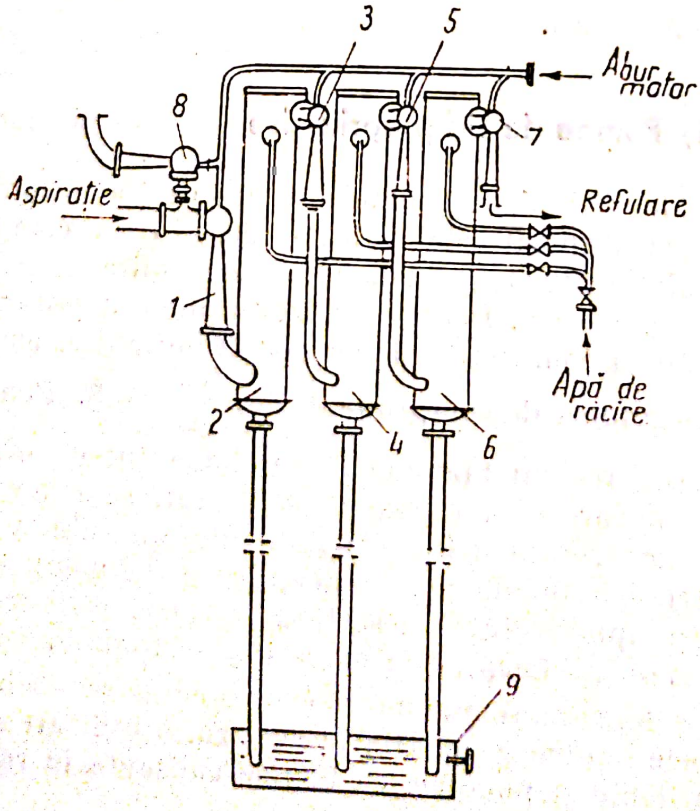


Fig. 101. Instalație de ejectare cu patru trepte:
1, 3, 5 — efectoare pentru treptele I, II, III; *2, 4, 6* — condensatoare barometrice; *7* — ejector final; *8* — ejector de pornire; *9* — vas pentru închidere hidraulică.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicații

Exercițiul 1

Pe conductele de aspirație și de refulare ale unei pompe sînt montate un vacuummetru și, respectiv, un manometru: distanța dintre acestea, măsurată pe verticală, este de 300 mm. În timpul funcționării, manometrul indică o presiune $p_m=3{,}4\cdot10^5$ N/m², iar vacuummetrul o presiune $p_v=0{,}45\cdot10^5$ N/m². Pompa este utilizată pentru transportul a 46,5 m³/h soluție cu densitatea de 1 100 kg/m³. Se cunosc valorile vitezelor în conducta de aspirație $w_a=1{,}45$ m/s și în conducta de refulare $w_r=1{,}98$ m/s. Se cere să se calculeze înălțimea manometrică a pompei.

Rezolvare

Se va utiliza ecuația (84) scrisă sub forma ecuației (85). În cazul problemei, punctele 1 și 2 între care se aplică ecuația, corespund pozițiilor de fixare a manometrului și a vacuummetrului. De aceea, înălțimea geometrică $Z_g=Z_2-Z_1$ corespunde distanței, măsurată pe verticală, între cele două aparate de măsură, $Z_g=0{,}3$ m. Presiunile p_1 și p_2 vor reprezenta chiar presiunile în punctele respective. Trebuie însă ținut seama în calcul că manometrul indică numai presiunea efectivă față de presiunea atmosferică, pe cînd vacuummetrul indică presiunea absolută în conductă; pentru a exprima și în conducta de refulare presiunea absolută, la indicația manometrului se adaugă valoarea presiunii atmosferice. Considerînd presiunea atmosferică $p_a=1$ at $=1{,}0132\cdot10^5$ N/m² pentru conducta de refulare se obține presiunea:

$$p_m=3{,}4\cdot10^5+1{,}0132\cdot10^5=4{,}4132\cdot10^5 \text{ N/m}^2$$

În acest caz, termenul din ecuația 85 se va calcula cu formula:

$$Z_p=\frac{p_2-p_1}{\rho\cdot g}=\frac{p_m-p_v}{\rho\cdot g}=\frac{4{,}4132\cdot10^5-0{,}45\cdot10^5}{9{,}81\times1\,100}=367 \text{ m},$$

Înălțimea corespunzătoare variației energiei cinetice va avea valoarea:

$$Z_d=\frac{w_2^2-w_1^2}{2g}=\frac{w_r^2-w_a^2}{2g}=\frac{1{,}98^2-1{,}45^2}{2\times9{,}81}=0{,}04 \text{ m}$$

Valoarea înălțimii manometrice se obține însumînd toți termenii ecuației (85). Neglijînd frecarea f, se obține înălțimea manometrică:

$$Z=Z_g+Z_p+Z_d=0{,}3+36{,}7+0{,}04=37{,}04 \text{ m}.$$

Exercițiul 2

Să se determine înălțimea maximă de aspirație a unei pompe care lucrează în următoarele condiții:

- debitul de pompat $Q_v=18$ m³/h apă;
- temperatura lichidului $t=43$°C;
- diametrul conductei de aspirație $d=0{,}073$ m;
- frecarea în conducta de aspirație $f=0{,}50$ m;
- presiunea în rezervorul de aspirație $p_1=250$ torr.

Rezolvare

Se va utiliza ecuația (83) și se va lucra în sistemul SI, astfel încît presiunea va fi exprimată în N/m². Presiunea p_2, pentru înălțimea maximă de aspirație, va fi egală cu presiunea vaporilor de apă la temperatura de pompare, $t=43$°C; la această temperatură, presiunea vaporilor apei (din tabele) are valoarea $p_2=977$ kgf/m². Transformînd în sistemul SI se obține:

$$p_1=0{,}250\cdot\rho_{Hg}\cdot g=0{,}250\times13\,600\times9{,}81=0{,}3333\cdot10^5 \text{ N/m}^2$$

$$p_2=977\times9{,}81=0{,}096\cdot10^5 \text{ N/m}^2.$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a calcula termenul corespunzător variației energiei cinetice, este necesar să se calculeze mai întîi viteza în conducta de aspirație:

$$w_2 = \frac{4\,Q_v}{3\,600 \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \times 18}{3\,600 \times 3{,}14 \times (0{,}073)^2} = 1{,}2 \text{ m/s}.$$

Densitatea apei, luată din tabele, la temperatura $t = 43°C$, are valoarea 990 kg/m³. Înlocuind valorile găsite, în ecuația (83) se obține:

$$Z = \frac{0{,}333 \cdot 10^5}{9{,}81 \times 990} - \left(\frac{0{,}096 \cdot 10^5}{9{,}81 \times 990} + \frac{1{,}2^2}{2 \times 9{,}81} + 0{,}50\right)$$

$$Z = 3{,}42 - (0{,}99 + 0{,}07 + 0{,}50) = 1{,}87 \text{ m}.$$

Rezultă că pompa va putea fi amplasată la o distanță, măsurată pe verticală, de maximum 1,87 m față de nivelul lichidului din rezervorul de aspirație.

Verificarea cunoștințelor

1. Care sînt parametrii principali în funcționarea pompelor pentru lichide?
2. Explicați modul de funcționare al injectoarelor și ejectoarelor.
3. De ce pompele cu piston au debitul de lichid neuniform? Care sînt modalitățile pentru uniformizarea debitului acestor pompe?
4. Enumerați avantajele pompelor cu plunger față de pompele cu piston.
5. Descrieți principiul de funcționare a dispozitivelor rotative.
6. Care este principiul de funcționare a pompelor centrifuge?
7. Definiți parametrii funcționali ai pompelor centrifuge.
8. Evidențiați avantajele pompelor centrifuge față de pompele cu mișcări alternative.
9. Cum se reglează debitul la diferite categorii de pompe pentru lichide?
10. Clasificați pompele pentru gaze.
11. Explicați comprimarea în trepte la compresoarele cu piston.
12. Cum se reglează debitul la compresoarele cu piston.
13. Descrieți construcția și funcționarea pompei cu inel lichid comparativ cu suflanta cu lamele culisante în rotor.
14. Ce sînt turbocompresoarele?
15. Enumerați cîteva tipuri de pompe de vid.

3. SEPARAREA SISTEMELOR ETEROGENE

Prin *sisteme eterogene* se înțeleg sistemele formate din două sau mai multe faze diferite. Una dintre faze care le delimitează sau le cuprinde pe celelalte se numește *fază continuă*, *fază dispersată* sau *fază externă* (mediu de dispersie), iar cealalta, *faza discontinuă*, *internă* sau *dispersă*. Faza continuă înconjură unitățile de volum ale fazei disperse și constituie mediul de dispersie în care sînt distribuite fazele disperse; această fază determină starea (lichidă sau gazoasă) a sistemului considerat. Unitățile de volum ale fazei disperse se numesc bule pentru gaz, picături pentru lichide și granule sau particule pentru solide.

Pentru industria chimică, o deosebită importanță prezintă sistemele eterogene gazoase $G-L$ și $G-S$ și sistemele eterogene lichide, în special $L-L$ și $L-S$.

Scanned with OKEN Scanner

În funcţie de natura sistemelor eterogene, de proprietăţile fizice ale fazelor componente, precum şi de puritatea impusă fazelor, separarea sistemelor eterogene lichide şi gazoase se realizează prin procedee de sedimentare, filtrare, procedee umede şi procedee electrice (ultimele în special pentru gaze). Separarea prin sedimentare şi filtrare poate fi realizată în cîmpul gravitaţional sau în cîmp centrifugal (centrifugare).

a. Separarea sistemelor eterogene lichide. Sedimentarea. Filtrarea

În industria chimică intervine foarte des necesitatea separării unor suspensii — fie rezultate din diferite procese chimice, fie, de multe ori, impuse de procesele tehnologice. Separarea poate urmări obţinerea fie a ambelor faze componente în stare cît mai pură, fie numai a uneia dintre faze. De asemenea, este necesară epurarea apelor reziduale înainte de a fi deversate în rîuri sau în vederea reutilizării lor.

1) Sedimentarea

Sedimentarea este operaţia de separare a suspensiilor (mai rar a emulsiilor) în fazele lor componente, ca urmare a deplasării particulelor fazei disperse, de densităţi diferite, sub acţiunea diferenţiată a gravitaţiei; de obicei, în cazul suspensiilor, faza solidă (faza dispersă) avînd densitatea mai mare se depune sub formă de *sediment*. Lichidul limpede rămas în urma sedimentării se numeşte *decantat*; îndepărtarea lichidului limpede se numeşte *decantare*.

Operaţia se numeşte *sedimentare* — cînd interesează separarea cît mai înaintată a ambelor faze — şi *clarificare* sau *limpezire* — cînd interesează mai mult separarea fazei lichide. Aparatele în care se realizează operaţia se numesc *decantoare* — pentru sedimentare — şi *clarificatoare* (*limpezitoare*) — pentru clarificare.

Particulele fazei disperse se depun din suspensia considerată datorită densităţii lor mai mari faţă de faza continuă. Sedimentarea particulelor are loc cu viteză constantă, numită *viteza de sedimentare*, a cărei valoare este determinată de echilibrul stabilit între forţa corespunzătoare greutăţii aparente a particulei şi forţa de frecare între aceasta şi mediul de dispersie.

Decantoare. Aparatele utilizate pentru separarea suspensiilor prin sedimentare se numesc decantoare. După modul de funcţionare, se deosebesc decantoare *continue*, *discontinue* şi *mixte*; la decantoarele mixte, alimentarea cu suspensie şi evacuarea fazei lichide decantate se fac în mod continuu, iar sedimentul se îndepărtează la anumite intervale de timp — discontinuu.

Decantoarele discontinue sînt recipiente de formă cilindrică sau paralelipipedică în care suspensia rămîne atîta timp cît are loc sedimentarea, după care faza lichidă este decantată cu un sifon basculant, iar sedimentul este îndepărtat manual.

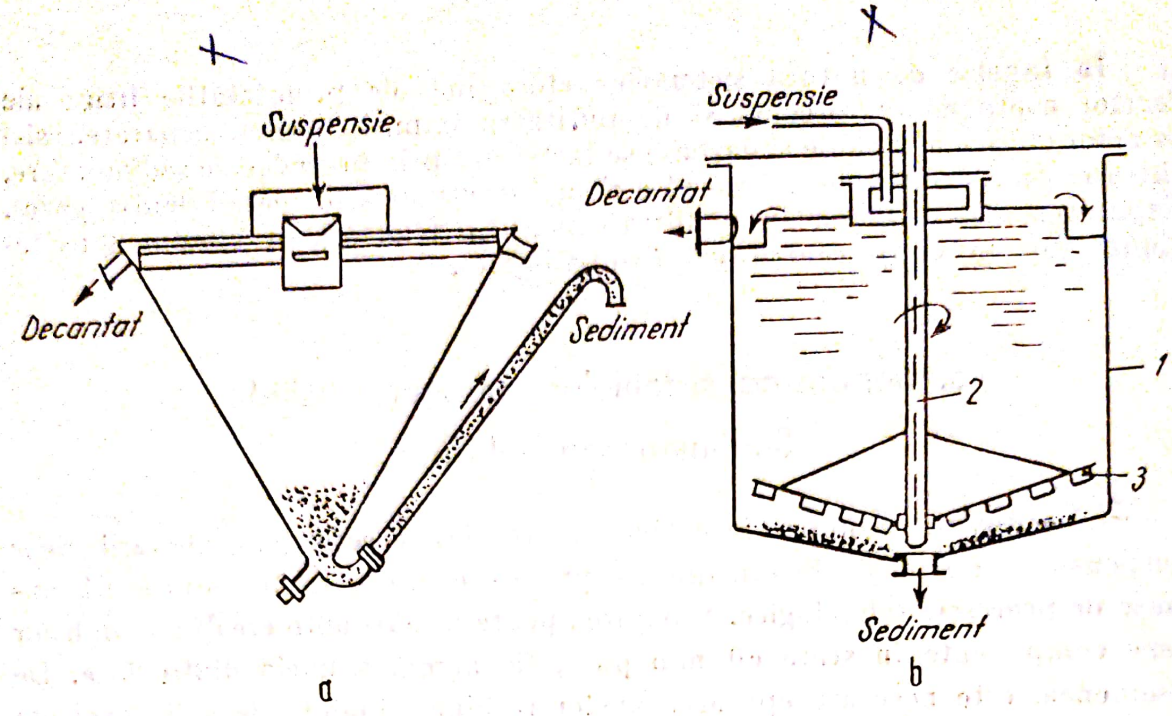


Fig. 102. Decantoare cu funcționare continuă:
a — decantor conic; *b* — decantor cu brațe; *1* — decantor; *2* — arbore; *3* — raclete.

Decantoarele mixte sînt bazine dreptunghiulare cu fund înclinat, pe care suspensia le parcurge de la un capăt la celălalt. Sedimentul este evacuat intermitent, manual sau mecanic.

În decantoarele cu funcționare continuă (fig. 102), suspensia de separat se alimentează la centrul aparatului, apoi traversează aparatul în direcție radială către periferie; în acest timp, granulele suspensiei se depun la fundul decantorului.

În figura 102, *a* este reprezentat un decantor conic, prevăzut cu un sifon pentru îndepărtarea continuă a sedimentului. Alimentarea cu suspensie se face printr-o pîlnie, în al cărei gît se găsește un plutitor pentru liniștirea curentului în suspensie. Decantatul este colectat de o rigolă periferică la partea superioară a decantorului.

În figura 102, *b* este reprezentată schema unui decantor cu brațe, cunoscut sub numele de decantor Dorr. Decantorul are formă cilindrică, înălțimea nu prea mare și fundul puțin înclinat către centru; decantorul este prevăzut cu două sau patru brațe cu raclete, acționate de un ax central, care se rotește cu 0,15—0,35 rot/min. Decantoarele cu brațe permit obținerea unui sediment concentrat prezentînd un grad avansat de modernizare. Principalul lor dezavantaj se datorește gabaritelor mari, necesitînd suprafețe întinse de teren. Pentru a reduce suprafața necesară și pentru a mări capacitatea decantoarelor s-au realizat *decantoare etajate*. În figura 103 se prezintă schema simplificată a unui decantor cu două etaje. Cele două compartimente comunică

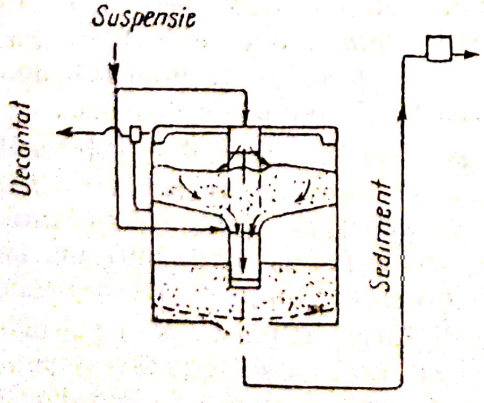


Fig. 103. Decantor cu două etaje.

printr-un tub central, care pătrunde sub nivelul suspensiei îngroşate din etajul inferior. Suspensia de separat se alimentează în ambele etaje, iar decantatul se evacuează prin partea superioară a celor două compartimente.

2. Filtrarea

Filtrarea reprezintă operaţia de separare a unei suspensii în fazele sale componente, cu ajutorul suprafeţelor filtrante sau a straturilor filtrante permeabile numai pentru mediul de dispersie; datorită diferenţei dintre mărimea particulelor fazei disperse şi dimensiunile porilor materialului filtrat, acestea sînt reţinute (fig. 104). În urma separării prin filtrare se obţine *filtratul*, care reprezintă faza lichidă liberă de faza dispersă (cu un grad mai mare sau mai mic de separare) şi *orecipitatul* reţinut pe suprafaţa sau stratul filtrant format din faza dispersă conţinînd însă şi o cantitate oarecare din faza lichidă (umiditate). Cînd se urmăreşte recuperarea cît mai avansată a fazei lichide sau cînd precipitatului i se impune un grad mare de puritate, operaţia de filtrare este urmată de *spălarea precipitatului*; spălarea precipitatului se face cu apă sau cu un alt lichid potrivit.

După terminarea filtrării şi spălarea precipitatului, suprafaţa de filtrare sau materialul filtrant se regenerează, pregătindu-se pentru o nouă filtrare. Prin *regenerare* se înţelege îndepărtarea precipitatului, spălarea suprafeţei filtrante sau a stratului, destuparea porilor.

Din punctul de vedere al separării fazei lichide, operaţia de filtrare apare ca o acţiune de curgere a filtratului prin stratul de precipitat şi prin materialul filtrant (curgerea prin straturi granulare). Pentru aceasta, filtratul trebuie să învingă rezistenţele datorită frecărilor în timpul curgerii prin stratul de precipitat şi prin materialul filtrant. Deoarece grosimea stratului de precipitat creşte în timpul filtrării, rezultă că rezistenţa la curgere a fluidului creşte continuu în timp. Pentru învingerea acestor rezistenţe este necesar ca suspensia să posede o suprapresiune faţă de spaţiul de sub suprafaţa filtrantă. Această diferenţă de presiune poate fi realizată chiar de coloana de suspensie de deasupra suprafeţei filtrante sau de către o pompă; se poate realiza şi o depresiune în spaţiul de sub suprafaţa filtrantă, cu ajutorul unei pompe de vid.

În timpul filtrării, diferenţa de presiune poate fi menţinută constantă sau variată prin creştere treptată.

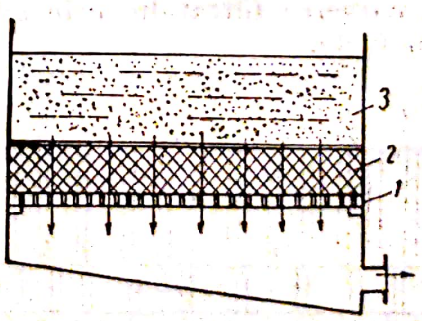


Fig. 104. Schema operaţiei de filtrare:
1 — suprafaţa filtrantă; *2* — strat de precipitat; *3* — suspensie.

Scanned with OKEN Scanner

Industrial, filtrarea se realizează fie la presiune constantă, fie la viteză de filtrare constantă; prin *viteza de filtrare* se înțelege cantitatea de filtrat care se obține pe unitatea de suprafață în unitatea de timp (m^2/m^3s.). Filtrarea la presiune constantă are loc cu scăderea vitezei de filtrare, deoarece în timpul filtrării crește rezistența stratului de precipitat (datorită creșterii grosimii). La filtrarea cu viteză constantă, diferența de presiune trebuie ridicată proporțional cu creșterea rezistenței stratului de precipitat.

Factorii care influențează filtrarea. Influența diverșilor factori se poate manifesta direct, asupra vitezei de filtrare (de exemplu, diferența de presiune), sau indirect, asupra structurii și rezistenței hidraulice a stratului de precipitat, asupra gradului de separare al celor două faze etc.

Structura suspensiei influențează permeabilitatea precipitatelor. Precipitatele obținute din particule sferice, în special cristaline, se numesc *precipitate necompresibile*. Cele obținute din particule deformabile, amorfe, sau sub formă de foițe, se numesc *precipitate compresibile*; la acestea creșterea presiunii duce la creșterea rezistenței de precipitat și uneori chiar la micșorarea vitezei de filtrare.

Viscozitatea filtratului influențează viteza de filtrare; cu scăderea viscozității crește viteza de filtrare.

Materialul filtrant, suprafața de filtrare sau stratul filtrant, au o importanță deosebită în operația de filtrare. Unui bun material filtrant i se cere să rețină cît mai bine faza dispersă, să aibă rezistență hidraulică redusă, să se regenereze ușor, să posede rezistență mecanică bună și să nu fie atacat de suspensia care se filtrează.

Grosimea stratului de precipitat, precum și modul cum decurge spălarea, influențează filtrarea. Viteza de filtrare scade cu creșterea stratului de precipitat, iar viteza de spălare este egală cu viteza de filtrare în ultimul moment al filtrării (stratul de precipitat nu mai crește); deci un strat prea mare de precipitat va micșora viteza de spălare, mărind astfel durata întregii operații. La spălarea precipitatelor se recomandă ca lichidul de spălare să curgă în același sens ca și filtratul (spălarea în echicurent); în acest mod se asigură o împingere (dislocație) a filtratului din porii precipitatului, fără a dilua filtratul cu apa de spălare.

Ecuațiile filtrării. Se va considera numai filtrarea la presiune constantă, care este cea mai des utilizată în industria chimică. În acest caz, diferența de presiune pe cele două fețe ale suprafeței filtrante se menține constantă; viteza de filtrare descrește în timpul operației. În figura 105 se prezintă un model fizic simplificat al operației de filtrare. În acest model se consideră că porii stratului de precipitat și ai suprafeței filtrante constituie niște canale paralele cu lungimea egală cu grosimea straturilor respective. Se poate deci asimila curgerea filtratului prin straturile respective cu o curgere obișnuită prin conducte.

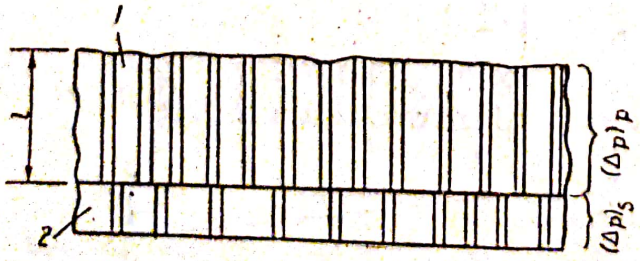


Fig. 105. Schema modelului fizic al filtrării:
1 — stratul de precipitat; 2 — materialul filtrant (suportul).

Scanned with OKEN Scanner

Diferența de presiune Δp pe cele două fețe ale filtrului este necesară pentru învingerea rezistenței la curgere în stratul de precipitat $(\Delta p)_p$ și în suprafața filtrantă $(\Delta p)_s$.

Timpul τ în care are loc filtrarea unui volum de filtrat q raportat la unitatea de suprafață, se calculează cu relația:

$$\tau = a \cdot q^2 + b \cdot q \qquad (94)$$

în care:

τ — timpul de filtrare, în s;

$q = \frac{V}{A}$ — volumul de filtrat raportat la unitatea de suprafață în m^3/m^2

V — volumul de filtrat, în m^3;

A — aria suprafeței filtrului, în m^2;

a — constanta caracteristică a stratului de precipitat;

b — constanta caracteristică suportului.

Cu ajutorul ecuației (94) se poate calcula timpul necesar filtrării volumului q de filtrat raportat la unitatea de suprafață filtrantă sau volumul care se poate filtra prin unitatea de suprafață în intervalul de timp τ.

Constantele a și b se determină grafic cu ajutorul datelor experimentale. Se reprezintă grafic valorile τ/q în funcție de q, obținute experimental. Se obține o dreaptă a cărei ordonată la origine este b, iar panta ei este egală cu a. Viteza de filtrare la un moment dat rezultă din relația:

$$w_f = \frac{1}{2a \cdot q + b} \cdot \qquad (95)$$

Viteza de spălare a precipitatului este egală cu viteza de filtrare în ultimul moment al filtrării.

Dacă spălarea precipitatului se face cu același lichid care constituie faza continuă a dispersiei, la aceeași temperatură și sub aceeași diferență de presiune, viteza de spălare se calculează cu ecuația (95), în care q reprezintă volumul total de lichid (raportat la suprafața de filtrare) obținut în timpul filtrării. Timpul necesar spălării se calculează direct din raportul dintre volumul apei de spălare q_s, raportat la suprafața și viteza de spălare: $\tau_s = q_s/w_s$.

Durata totală a operației de filtrare cuprinde, pe lîngă timpul de filtrare și spălare și timpul descărcării precipitatului și pregătirii filtrului.

Utilaje pentru filtrare. Utilajele în care se realizează operația de filtrare se numesc filtre.

1) *Filtre cu strat granular.* La aceste filtre, particulele fazei disperse sînt reținute atît la suprafața stratului filtrant cît și în interiorul masei sale filtrante (filtrarea în adîncime). Straturile filtrante sînt formate din granule de nisip, calcar, antracit, mangal etc. Se utilizează în special pentru filtrarea apei.

2) *Filtre nuce.* Reprezintă utilaje de filtrare cu suprafața filtrantă orizontală, asemănătoare pîlniilor filtrante de laborator. Filtrele nuce pot fi *deschise*, lucrînd sub depresiune, și *închise*, lucrînd sub presiune (fig. 106). Constau dintr-un recipient cilindric sau paralelipipedic prevăzut cu o suprafață filtrantă dispusă la o oarecare distanță de fundul aparatului. Suprafața filtrantă poate fi o placă ceramică poroasă sau o pînză întinsă pe un grătar

Scanned with OKEN Scanner

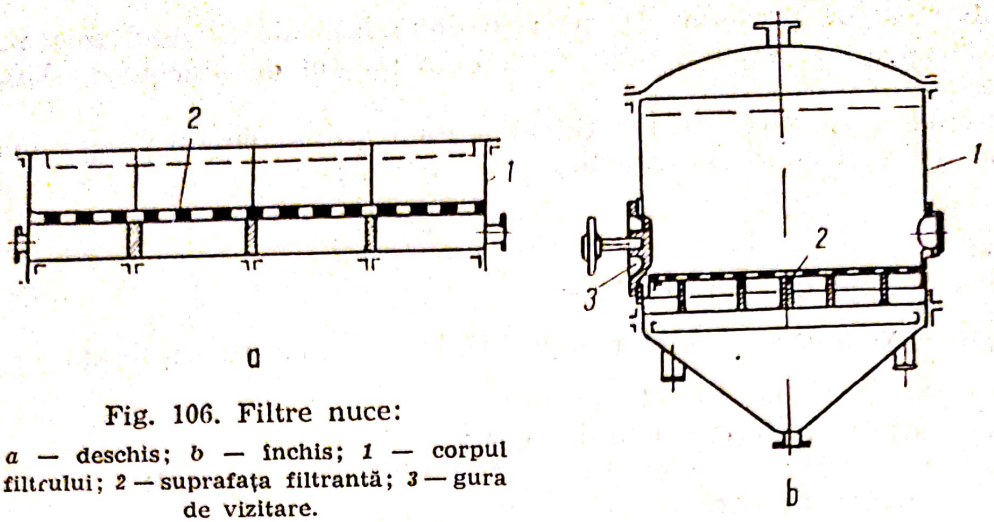


Fig. 106. Filtre nuce:
a — deschis; *b* — închis; *1* — corpul filtrului; *2* — suprafața filtrantă; *3* — gura de vizitare.

de susținere. La filtrele deschise diferența de presiune este realizată de o pompă de vid în legătură cu spațiul de sub suprafața filtrantă.

Filtrele nuce închise lucrează sub presiunea de circa 4 at, realizată prin introducerea aerului comprimat sau a unui gaz inert deasupra stratului de suspensie; prezintă avantajul unei viteze mai mari de filtrare și a posibilității de filtrare a unor suspensii toxice sau inflamabile.

Deși au construcția simplă și funcționarea sigură, filtrele nuce prezintă o serie de dezavantaje legate de suprafața mare pe care o ocupă, manoperă multă, spălarea defectuoasă a precipitatului.

Pentru înlăturarea acestor dezavantaje s-au construit *filtre suprapuse* (etajate) și *filtre cu descărcare automată*; descărcarea automată se realizează fie prin bascularea întregului filtru, fie prin rabatarea părții inferioare, astfel încît precipitatul se desprinde singur sau este îndepărtat cu raclete sau cu jeturi de apă.

3) *Filtre presă.* Acestea sînt utilaje caracterizate printr-o mare compactitate, datorită construcției lor din elemente de filtrare identice sau diferite (mai mult funcțional) care permit concentrarea unei mari suprafețe de filtrare într-un volum relativ redus. Filtrele presă constau din elemente de filtrare și de distanțare — plăci și rame — (fig. 107) dispuse alternativ. Această dispunere asigură formarea unor spații de filtrare — camere — în care se introduce suspensia; precipitatul se depune pe pereții plăcilor de filtrare.

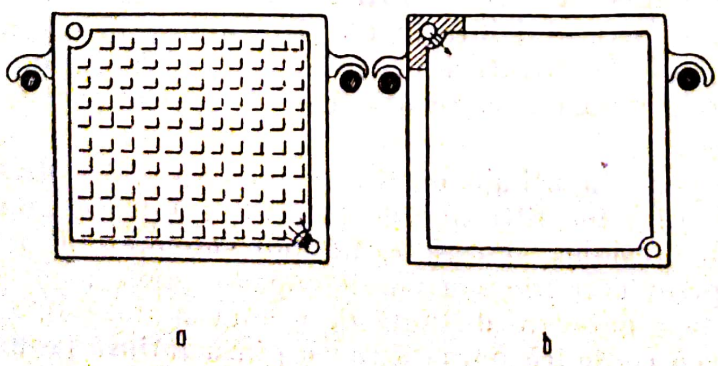


Fig. 107. Plăci și rame pentru filtre presă:
a — placă;
b — ramă.

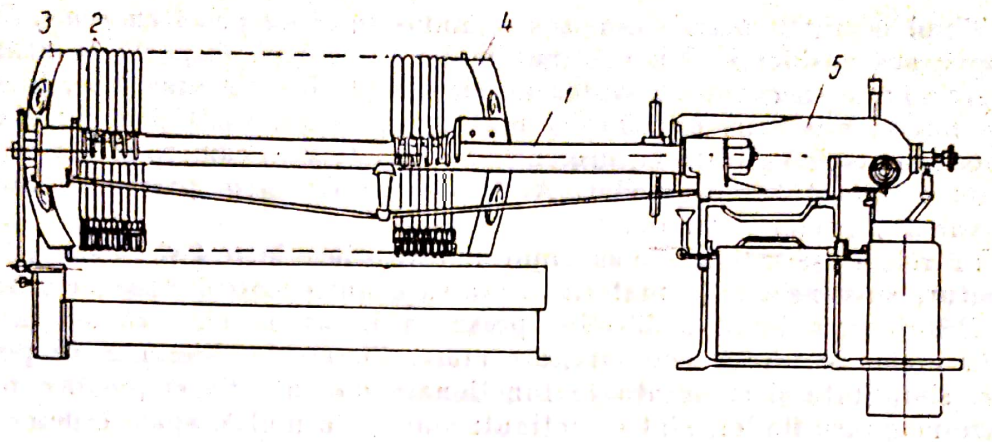


Fig. 108. Vedere generală a unui filtru presă:

1 — surub pentru presarea plăcilor şi a ramelor; *2* — rame; *3* — placa marginală fixă; *4* — placa marginală mobilă; *5* — dispozitiv pentru strîngerea hidraulică.

Placa filtrantă de formă pătrată sau circulară, uneori cu marginile îngroşate, are ambele feţe striate pentru a uşura colectarea filtratului. În colţurile opuse ale plăcilor sînt prevăzute orificii pentru introducerea suspensiei şi a lichidului de spălare şi pentru evacuarea filtratului.

Ramele sînt cadre goale, prevăzute cu aceleaşi orificii ca şi plăcile; ele se aşază între plăci pentru a mări camera de filtrare, permiţînd astfel obţinerea unui strat mai gros de precipitat.

Atît plăcile cît şi ramele sînt prevăzute cu cîte doi umeri pentru sprijinirea pe nişte bare orizontale ale postamentului filtrului. Plăcile şi ramele se aşază alternativ, între ele întinzîndu-se pînzele de filtrare; orificiile din colţurile plăcilor şi ramelor (în dreptul cărora şi pînza de filtrare are orificii), formează prin strîngerea acestora canalele de alimentare şi evacuare. Strîngerea elementelor filtrante în vederea etanşării se realizează cu ajutorul unui şurub sau cu o presă hidraulică, aşa cum se prezintă în figura 108.

După întinderea pînzelor şi strîngerea elementelor, filtrul este pregătit pentru filtrare. Suspensia de separat este introdusă în filtru cu ajutorul unei pompe şi, din canalul de alimentare, este distribuită prin deschiderile ramelor în spaţiile (camerele) de filtrare. Faza lichidă trece prin pînza filtrantă, se scurge prin striaţiunile plăcii şi se colectează în canalul de evacuare. O astfel de evacuare a filtrului se numeşte închisă; se utilizează şi evacuarea deschisă cînd filtratul este evacuat de pe fiecare placă în parte.

Uneori faza lichidă reţinută în precipitat este îndepărtată prin suflare cu abur sau aer sub presiune. În cazul spălării precipitatului, aceasta se poate realiza în două moduri: *spălarea simplă* şi *spălarea în adîncime.*

Spălarea simplă (spălarea în curent paralel) se realizează introducînd lichidul de spălare în acelaşi circuit şi în acelaşi sens ca şi suspensia.

După spălarea precipitatului, se slăbeşte dispozitivul de strîngere a plăcilor şi ramelor, se distanţează şi precipitatul cade singur sau este desprins manual; se curăţă pînzele filtr ante, se strînge din nou filtrul şi operaţia poate reîncepe.

Tipul de filtru descris mai sus se numeşte *filtru presă cu rame*. Pentru filtrarea suspensiilor cu un conţinut mai mic de fază dispersă se utilizează şi *filtrele presă cu cameră*. Acestea au elementele filtrante identice, fiind formate numai din plăci cu margini mai groase astfel încît prin strîngere să formeze camerele de filtrare. Suspensia se introduce în camere printr-un canal central comun tuturor plăcilor. Aceste tipuri de filtre prezintă dificultăţi la fixarea pînzelor filtrante.

Filtrele presă lucrează la suprapresiuni cuprinse între 4 şi 15 at, în funcţie de natura suspensiei şi de materialul din care sînt construite plăcile şi ramele.

Răspîndirea largă a filtrelor presă în industria chimică se datoreşte următoarelor avantaje: compactitate mare, filtrare la diferenţă de presiune mare, simplitate şi siguranţa în funcţionare datorită lipsei pieselor mobile. Dintre neajunsurile lor, sînt de reţinut: manoperă multă, spălare defectuoasă a precipitatului, consum mare de material filtrant.

4) *Filtre rotative*. Prin construcţia şi principiul lor de funcţionare, filtrele din această categorie asigură succesiunea tuturor fazelor — filtrare, spălare, îndepărtarea precipitatului, regenerarea suprafeţei filtrante — astfel încît operaţia de filtrare, în ansamblu, se desfăşoară continuu. În figura 109 este

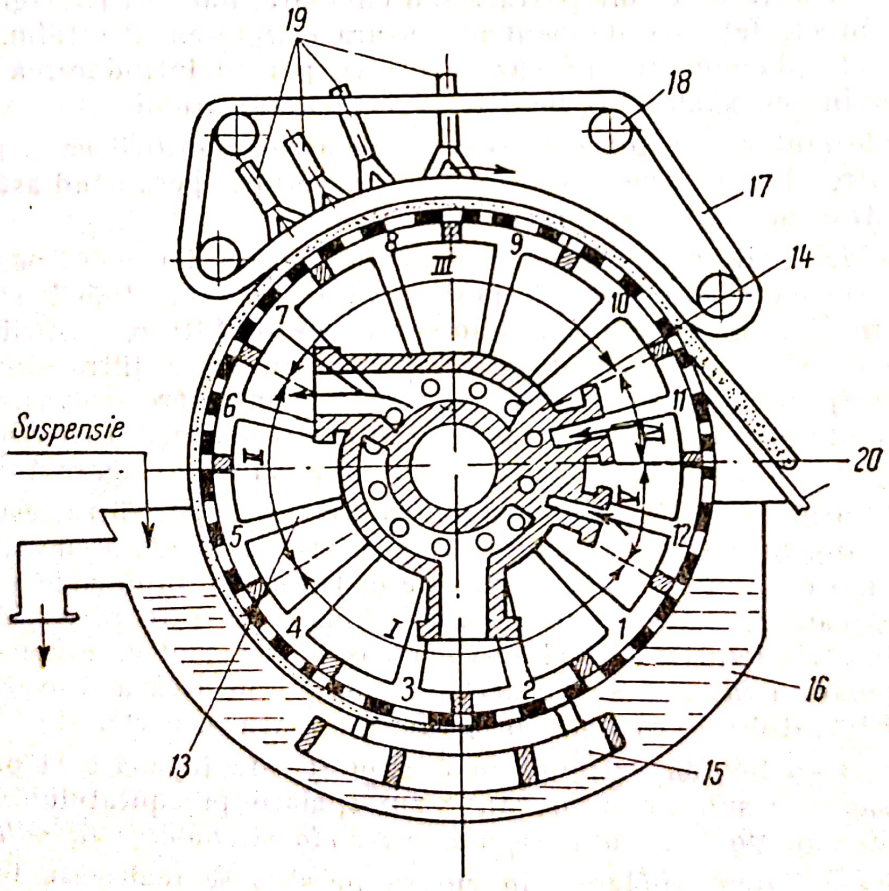


Fig. 109. Filtru celular cu tambur rotativ:

1—12 — celule de filtrare; *13* — conducte de legătură; *14* — capul de distribuţie; *15* — agitator; *16* — cuvă de suspensie; *17* — pînză de egalizare; *18* — rulou de ghidare; *19* — stropitoare pentru apa de spălare; *20* — cuţit pentru desprinderea precipitatorului; *I* — filtrare; *II* — descărcare; *III* — spălare şi descărcare; *IV* — slăbirea precipitatorului; *V* — regenerarea pînzei filtrante.

Scanned with OKEN Scanner

reprezentată schema unui filtru celular cu tambur rotativ. Pînza filtrantă este fixată pe un tambur orizontal care constă din doi cilindri coaxiali; spaţiul dintre cei doi este împărţit în celule de către pereţi longitudinali montaţi radial. Cilindrul exterior este perforat şi constituie suportul pînzelor de filtrare. Fiecare celulă comunică, printr-o conductă de legătură, cu capul de distribuţie care se găseşte la extremitatea arborelui tubular pe care este montat tamburul.

Capul de distribuţie este format dintr-un disc mobil, fixat la capătul arborelui, avînd găuri care reprezintă capetele conductelor de legătură, şi un disc fix, mai gros, avînd pe faţa dinspre discul mobil practicate adînciturі, de lungime mai mare sau mai mică, în legătură cu conductele de vid şi de aer comprimat; lungimea acestor adînciturі permite celulelor, prin intermediul conductelor de legătură, să se găsească un timp mai mare sau mai mic, sub vid sau sub acţiunea aerului comprimat. Etanşarea între cele două discuri, care au feţe în contact bine şlefuite, se realizează datorită apăsării unui resort.

În figura 109 discul fix este reprezentat în secţiune; în dreptul adînciturilor se văd capetele conductelor de pe discul mobil. Prin intermediul capului de distribuţie celulele filtrului sînt puse succesiv în legătură cu conductele de vid sau de aer comprimat. Tamburul se roteşte cu turaţie mică, pătrunzînd cu partea inferioară în cuva în care se aduce suspensia de separat; pentru a evita sedimentarea suspensiei, aceasta este agitată cu un dispozitiv pendular.

Precipitatul depus pe suprafaţa filtrantă, în timpul rotirii tamburului, este îndepărtat cu un cuţit fixat la o distanţă mică de tambur.

Fiecare celulă a filtrului rotativ se comportă ca un filtru nuce de—sine—stătător. În timpul unei rotaţii a tamburului celulele trec prin toate fazele filtrării (*I . . . V*), aşa cum rezultă din figură.

Îndepărtarea precipitatului de pe pînza filtrantă, cu ajutorul cuţitului de desprindere, prezintă dificultăţi mai ales la filtrele mari (ruperea pînzei, îndepărtarea parţială a precipitatului). De aceea, uneori se folosesc şnururi sau sfori de preluare a precipitatului, care la un moment dat părăsesc suprafaţa tamburului, trec peste un rulou de diametru mic unde precipitatul cade, revenind apoi din nou pe suprafaţa tamburului.

În schiţa din figură în dreptul zonei de spălare este montată o pînză fără sfîrşit întinsă pe role de ghidare. Această pînză are rolul de a egaliza suprafaţa precipitatului pentru a asigura spălarea uniformă a acestuia; în acelaşi timp, aceasta apasă asupra precipitatului storcînd într-o oarecare măsură lichidul reţinut.

Filtrele celulare rotative sînt utilaje mari, complexe şi costisitoare; diametrul tamburului are între 1 şi 3 m; lungimea 0,35—4,5 m; suprafaţa de filtrare variind între 1 şi 40 m^2. Aceste filtre se utilizează la separarea unor debite mari de suspensie cu un conţinut mare de fază dispersă.

Pentru filtrarea unor suspensii a căror fază dispersă are densitate mare, pentru a evita sedimentarea particulelor mari şi reţinerea pe pînză în momentul iniţial (la intrarea suspensiei în celulă) a particulelor fine care măresc rezistenţa precipitatului, s-au construit filtre celulare cu suprafaţa filtrantă interioară. Aceste filtre au aceleaşi principii de funcţionare. Pînza filtrantă este întinsă pe suprafaţa perforată a cilindrului interior. Suspensia se introduce

Scanned with OKEN Scanner

chiar în tamburul de filtrare; în acest fel la suprafaţa de filtrare vor avea acces mai întîi particulele cu diametru mai mare.

Pentru filtrarea unor suspensii uşor filtrabile se utilizează filtre celulare cu suprafaţa filtrantă orizontală.

3) Centrifugarea

Centrifugarea reprezintă un mijloc, o tehnică de lucru, pentru intensificarea operaţiilor de separare a sistemelor eterogene lichide. Prin efectuarea operaţiilor de sedimentare şi filtrare într-un cîmp centrifugal, creat prin rotirea unui tambur în care se găseşte suspensia, aceste operaţii decurg cu viteze mai mari, datorită faptului că forţa centrifugă care se exercită asupra fazelor suspensiei depăşeşte de multe ori forţa care se exercită în cîmpul gravitaţional (forţa gravitaţiei). Utilajele de separare prin centrifugare se numesc centrifuge.

Consideraţii generale. Forţa centrifugă C exercitată asupra unui mobil de masă m, care se deplasează pe o traiectorie circulară cu raza R, este dată de relaţia:

$$C=m\cdot\omega^2\cdot R=m(2\cdot\pi\cdot n)^2R, \tag{96}$$

în care:

w este viteza unghiulară;

n — turaţia.

Din ecuaţia (96) rezultă că forţa centrifugă depinde de masa corpului, de turaţie şi de raza traiectoriei. Comparînd ecuaţia (96) cu expresia forţei gravitaţionale pentru mobilul de aceeaşi masă $G=m\cdot g$, rezultă posibilitatea de a varia forţa centrifugă, fie prin mărirea turaţiei, fie prin mărirea razei, ambele mărind acceleraţia cîmpului de forţe centrifuge, $\omega^2\cdot R$. Raportul Z dintre acceleraţia cîmpului centrifugal şi acceleraţia cîmpului gravitaţional se numeşte **factor de eficacitate** sau **factor de separare:**

$$Z=\frac{\omega^2\cdot R}{g}. \tag{97}$$

Centrifugele se construiesc avînd factori de eficacitate cu valori începînd de la cîteva zeci pînă la valori de ordinul milioanelor, în cazul ultracentrifugelor.

Prin rotirea suspensiei împreună cu tamburul în care are loc separarea, datorită forţei centrifuge care se dezvoltă, suspensia ia forma unui paraboloid. La turaţii mari ale tamburului centrifugii se poate considera că suprafaţa suspensiei centrifugate are formă cilindrică (fig. 110).

Sedimentarea într-un cîmp de forţe centrifuge (fig. 110, *b*). Ca rezultat al acţiunii diferenţiate a forţei centrifuge asupra celor două faze, *se formează un strat de sediment* pe peretele tamburului şi *un strat de lichid limpede, decantatul*, către interiorul tamburului; lichidul decantat se scurge peste capacul tamburului în mantaua protectoare şi se îndepărtează.

Scanned with OKEN Scanner

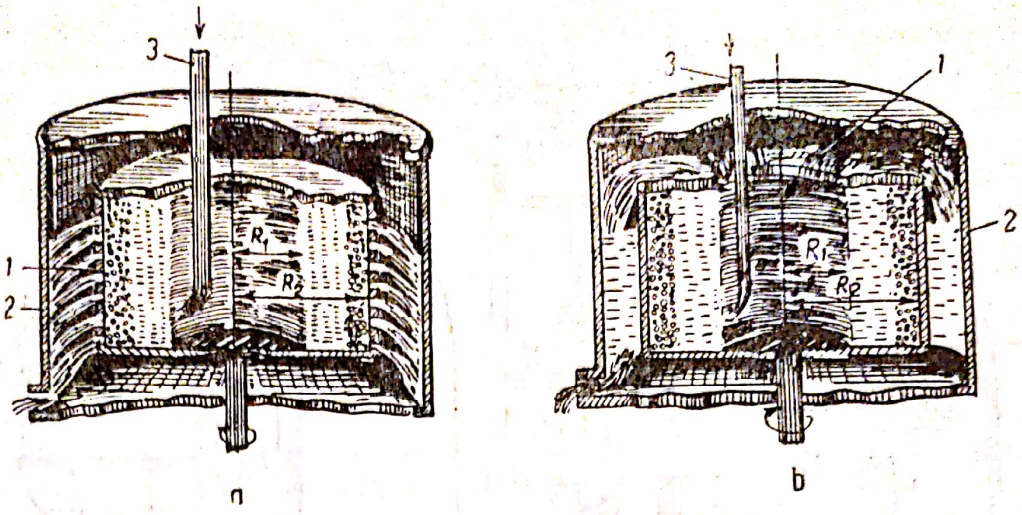


Fig. 110. Centrifuge:
a — de filtrare; *b* — de sedimentare (decantare); *1* — tamburul (coşul) centrifugei; *2* — manta de protecţie; *3* — conductă de alimentare cu suspensie.

Sedimentarea într-un cîmp de forţe centrifuge prezintă următoarele avantaje: viteze mari de sedimentare, separarea particulelor mai fine, deci grad mai înaintat de separare, şi posibilitatea de separare a fazelor de densităţi ρ_1 şi ρ_2 *apropiate.*

Filtrarea într-un cîmp de forţe centrifuge. Forţa centrifugă acţionează ca şi în cazul sedimentării. În acest caz, deosebirea constă în aceea că tamburul centrifugei (coşul) este perforat iar suprafaţa sa interioară este acoperită cu o pînză filtrantă (figura 110, *a*). Suspensia este aruncată de forţa centrifugă către pereţii coşului, faza solidă este reţinută pe suprafaţa filtrantă, iar filtratul trece prin pînza filtrantă, prin orificiile coşului în mantaua de protecţie, de unde este evacuat. Intensificarea filtrării în cîmpul de forţe centrifuge se datoreşte creşterii presiunii suspensiei pe pereţii coşului, datorită acţiunii forţei centrifuge.

Timpul necesar filtrării sau volumul de filtrat obţinut se calculează cu ecuaţia generală (94) obţinută la filtrare; constantele *a* şi *b* se vor determina experimental, la o presiune corespunzătoare centrifugii filtrante. La centrifugele filtrante discontinue se va ţine seama şi de timpul de încărcare, de evacuare a precipitatului, de regenerare a pînzei filtrante.

Filtrarea într-un cîmp de forţe centrifuge se caracterizează prin viteze mari de filtrare şi permite obţinerea unor precipitate cu un conţinut redus de fază lichidă (desecat).

Tipuri de centrifuge. După factorul de eficacitate centrifugele se clasifică în centrifuge normale ($Z<3\,500$), supercentrifuge ($Z>3\,500$) şi ultracentrifuge ($Z>10^6$).

După scopul centrifugării se deosebesc centrifuge filtrante pentru filtrarea suspensiilor, centrifuge decantoare pentru sedimentarea suspensiilor şi centrifuge separatoare pentru separarea emulsiilor.

Centrifuge filtrante. În figurile 111 şi 112 sînt reprezentate două centrifuge filtrante cu funcţionare discontinuă. Figura 111 reprezintă o centrifugă

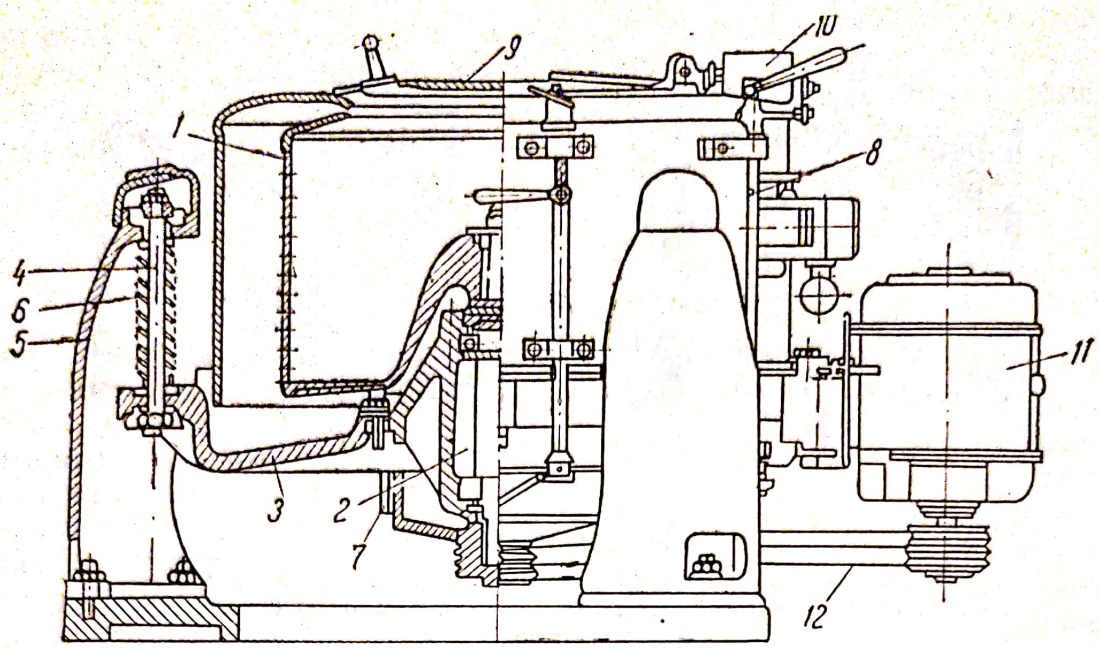


Fig. 111. Centrifugă filtrantă pe trei coloane cu descărcare manuală:

1 — tambur perforat; *2* — arborele tamburului; *3* — postament; *4* — tiranți; *5* — coloană de susținere; *6* — arc elicoidal; *7* — frînă cu bandă; *8* — tija de acționare a frînei; *9* — capac; *10* — întrerupătorul motorului electric; *11* — motor; *12* — curele de transmisie.

pe trei coloane cu descărcarea manuală a precipitatului. Construcția respectivă permite amortizarea vibrațiilor tamburului de către resoartele celor trei coloane pe care se sprijină postamentul centrifugei. Aceste centrifuge sînt recomandabile pentru filtrarea suspensiilor care necesită o durată mare de filtrare și spălare.

Pentru reducerea manoperei de descărcare a precipitatului se utilizează centrifuga cu descărcare automată, a cărei schemă este redată în figura 112. Partea inferioară a tamburului centrifugei are formă conică, cu o înclinare mai mare decît unghiul taluzului natural al precipitatului; datorită acestei construcții, descărcarea precipitatului se face automat, la reducerea turației centrifugei, prin cădere, datorită greutății proprii.

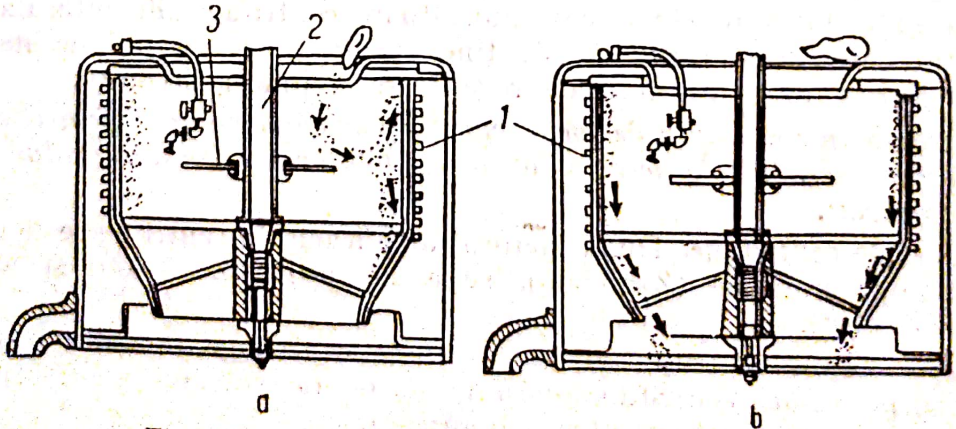


Fig. 112. Centrifugă cu descărcare automată:

a — încărcare cu suspensie; *b* — descărcarea precipitatului; *1* — tambur perforat; *2* — arbore; *3* — disc de împrăștiere.

Încărcarea centrifugei cu suspensie se face fără oprirea centrifugei; distribuirea uniformă a suspensiei în timpul încărcării se asigură cu un disc montat pe arborele centrifugei. Se recomandă pentru separarea suspensiilor care necesită durată scurtă de filtrare şi spălare.

Pentru a reduce timpii neproductivi şi a mări productivitatea centrifugilor discontinue, s-au construit centrifuge automate care execută succesiv, după un program, toate fazele centrifugării. În figura 113 este redată schema unei centrifuge automate dublă, cu axa orizontală. În asemenea centrifuge încărcarea cu suspensie şi evacuarea precipitatului se realizează automat, la turaţia de regim, fără oprirea sau încetinirea turaţiei centrifugei. Descărcarea din mers a precipitatului se realizează cu ajutorul unor cuţite care, independent de tambur, se mişcă în sus şi în jos, raclînd precipitatul. Alimentarea cu suspensie, filtrarea, îndepărtarea precipitatului, spălarea acestuia, se realizează succesiv, durata lor fiind reglată de un servomotor hidraulic care acţionează după un program prestabilit; durata unui întreg ciclu de funcţionare nu depăşeşte 10 min, însă în cazuri speciale poate depăşi chiar o oră.

Avantajele acestor centrifuge decurg din automatizarea completă a operaţiei care reduce ciclul de centrifugare şi pierderile de energie (la frînare şi oprire); prezintă dezavantajul sfărîmării precipitatului în timpul îndepărtării.

Centrifugele filtrante cu funcţionare continuă permit obţinerea unor productivităţi mari datorită desfăşurării concomitente a tuturor fazelor operaţiei; alimentarea cu suspensie, filtrarea, spălarea precipitatului, evacuarea filtratului şi a apei de spălare se realizează neîntrerupt.

Centrifuga schiţată în figura 114, asigură continuitatea întregii operaţii, evacuarea precipitatului realizîndu-se pulsat prin împingerea sa de către un disc care execută o mişcare pe orizontală. Mişcarea alternativă a discului

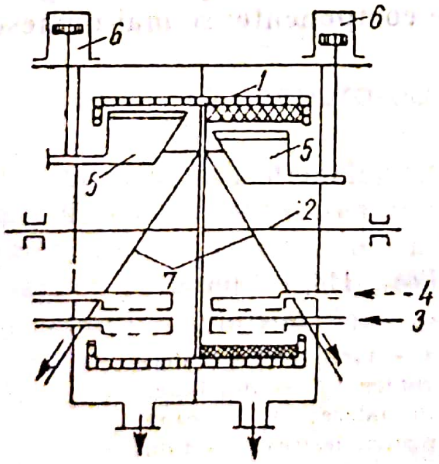


Fig. 113. Schiţa unei centrifuge automate duble:

1 — tambur; *2* — arbore; *3, 4* — conducte de alimentare cu suspensie, respectiv cu apă de spălare; *5* — cuţit de desprindere; *6* — servomotor; *7* — plan înclinat pentru evacuarea precipitatului.

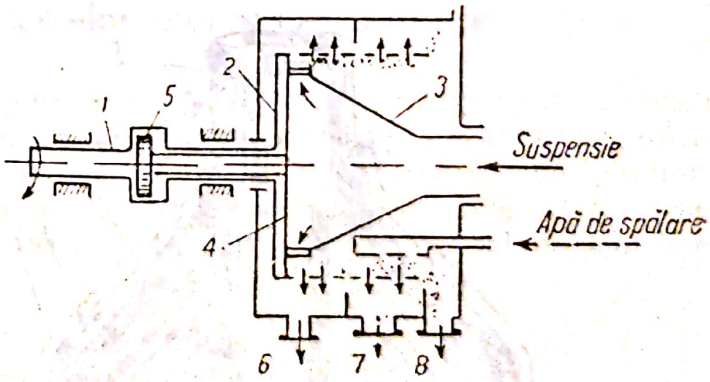


Fig. 114. Schiţa unei centrifuge cu împingere pulsată a precipitatorului:

1 — arbore; *2* — tambur; *3* — con interior; *4* — disc de împingere; *5* — pistonul discului; *6, 7, 8* — racorduri pentru evacuarea filtrantului, respectiv a apei de spălare şi a precipitatorului.

Scanned with OKEN Scanner

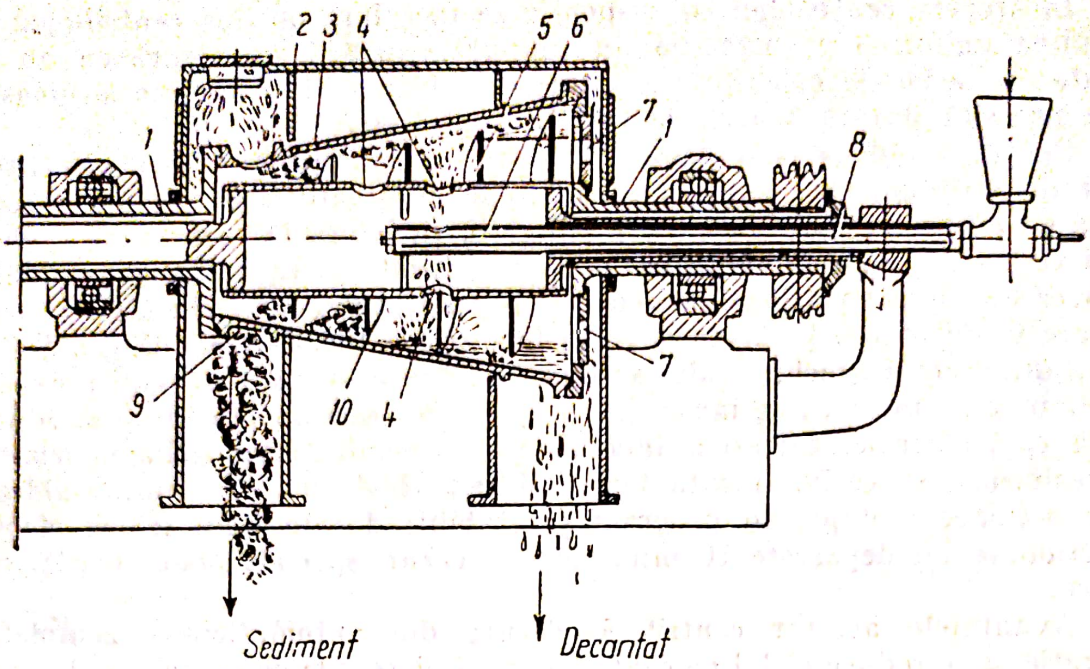


Fig. 115. Centrifugă de sedimentare cu melc, cu transportor elicoidal:

1 — arbore tubular pentru tamburul exterior; *2* — manta; *3* — tambur conic exterior; *4* — deschideri pentru suspensie şi apă de spălare; *5* — tambur cilindric interior; *6* — conductă pentru suspensie; *7* — fereastră pentru decantat; *8* — conductă pentru apa de spălare; *9* — evacuarea sedimentului; *10* — spirele melcului.

care realizează împingerea pulsată a precipitatului este asigurată de către un mic piston montat pe tija discului; pistonul este acţionat hidraulic. Se caracterizează prin productivităţi mari, însă prezintă dezavantaje legate de consumul mare de energie şi uzura suprafeţelor filtrate; filtratul obţinut este tulbure.

Centrifuge decantoare. Servesc pentru sedimentarea suspensiilor greu filtrabile sau pentru separarea emulsiilor în fazele componente; se mai numesc *centrifuge de sedimentare* sau *separatoare.*

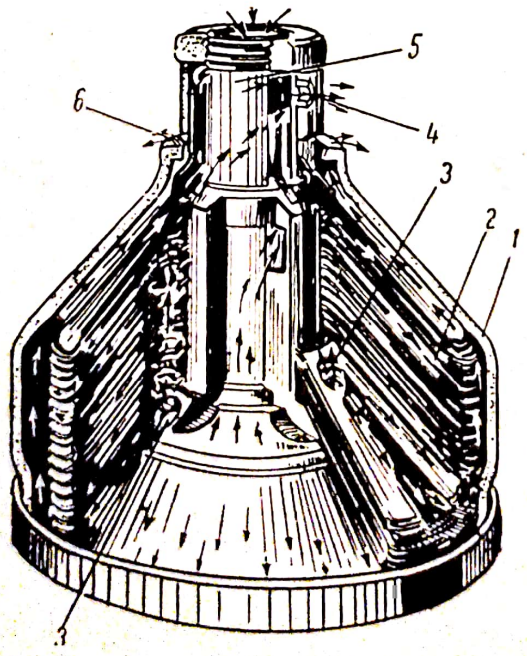


Fig. 116. Separator cu talere:

1 — tambur; *2* — talere conice; *3* — deschideri în talere; *4* — canal pentru ieşirea lichidului uşor; *5* — tub central pentru alimentare; *6* — canal pentru ieşirea lichidului greu.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru separarea suspensiilor, o utilizare mai largă cunosc centrifugele cu camere şi în special centrigufele decantoare cu transportor elicoidal. Pentru a micşora durata de sedimentare, centrifugele cu cameră au tamburul construit din mai mulţi cilindri coaxiali, formînd astfel camere de sedimentare pe care suspensia le parcurge succesiv.

Centrifuga decantoare cu funcţionare continuă din figura 115 realizează îndepărtarea continuă a sedimentului depus pe pereţii tamburului conic cu ajutorul unei suprafeţe elicoidale montate pe un tambur cilindric împărţit în două compartimente şi prevăzut cu deschideri pentru alimentarea cu suspensie şi apă de spălare. Sedimentul obţinut din prima parte a tamburului conic este transportat de către suprafaţa elicoidală către partea cu diametru mai mic, este spălat cu apa introdusă prin cel de-al doilea compartiment al cilindrului interior, desecat şi evacuat; decantatul se evacuează în sens invers datorită forţei centrifuge. Acest tip de centrifugă prezintă următoarele avantaje: productivitate mare, posibilitate de separare a unor suspensii cu un conţinut mare de fază solidă. Dezavantajele sale se referă la consumul mare de energie, sfărîmarea sedimentului, impurificarea decantatului.

Pentru separarea cît mai avansată a fazelor componente ale unei emulsii se utilizează *separatoarele cu talere*, a căror schemă de funcţionare este redată în figura 116. Denumirea acestora provine de la existenţa unor conuri de tablă suprapuse (talere) care împart lichidul din interiorul tamburului în straturi subţiri, reducînd astfel durata de separare. Această realizare constructivă permite obţinerea unui grad mare de separare, deoarece fazele componente o dată separate nu mai au posibilitatea să se întîlnească. Emulsia de separat este alimentată prin tubul central; prin deschiderile practicate în talerele separatoare pătrunde în spaţiul delimitat de două talere consecutive. Sub acţiunea forţei centrifuge, lichidul greu se îndreaptă pe faţa inferioară a talerelor către peretele tamburului, iar lichidul uşor se îndreaptă către centrul centrifugei, urcînd pe faţa superioară a talerelor, fiind evacuat din centrifugă prin canale corespunzătoare.

b. Separarea sistemelor eterogene gazoase

Separarea sistemelor eterogene gazoase foloseşte, în general, aceleaşi principii ca şi separarea sistemelor eterogene lichide; diferenţierile sau utilizarea altor principii se datoresc proprietăţilor caracteristice ale gazelor, precum şi scopului urmărit prin realizarea separării respective. Procedeele de separare aplicate sînt funcţie de scopul separării şi de gradul de separare impus.

1) Separarea prin sedimentare

Separarea prin sedimentare a sistemelor gazoase se realizează în camere de desprăfuire, pe care gazul le parcurge cu viteză mică — 0,2 . . . 0,4 m/s — pentru ca praful din gaz să aibă timp să se depună.

Gradul de separare a camerelor de sedimentare variază între 40 şi 70%.

În vederea îmbunătăţirii gradului de separare s-au construit camere de desprăfuire cu polițe (rafturi) situate la distanţa de 40—100 mm (fig. 117);

Scanned with OKEN Scanner

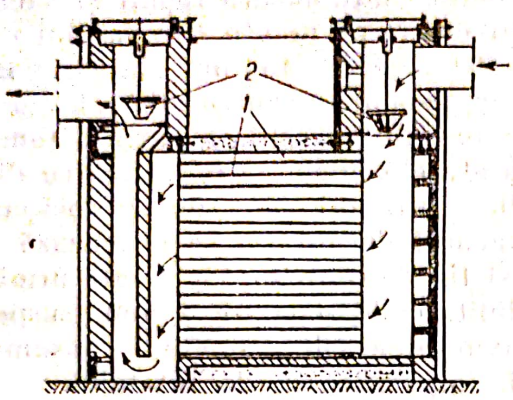


Fig. 117. Camera de desprăfuire cu polițe:
1 — polițe; *2* — ventile.

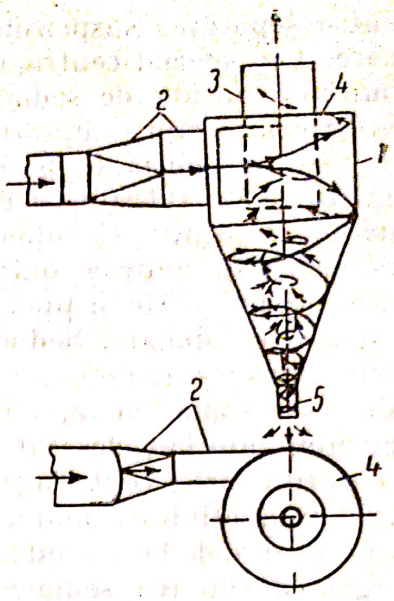


Fig. 118. Ciclon:
1 — manta; *2* — racord de intrare a gazului; *3* — tub central pentru ieșirea gazului; *4* — capac; *5* — deschidere pentru evacuarea prafului.

reducerea înălțimii de sedimentare (distanța dintre două polițe) are ca efect scăderea diametrului minim, pentru n polițe de $\sqrt{n+1}$ ori, și deci, ca urmare, creșterea gradului de separare.

Camerele de desprăfuire sînt voluminoase și de eficacitate mică; din această cauză ele se utilizează numai pentru separări grosiere, prealabile.

2) Separarea într-un cîmp de forțe centrifuge

Procedeele de separare prin centrifugare utilizează aceleași principii stabilite la centrifugarea sistemelor eterogene lichide, cu deosebirea că realizarea cîmpului centrifugal se datorește însăși energiei cinetice a gazului la intrare în aparatul respectiv. Utilajele care servesc la separarea sistemelor eterogene gazoase într-un cîmp de forțe centrifuge se numesc **cicloane**. Construcția acestor utilaje (fig. 118) urmărește crearea cîmpului centrifugal ca urmare a însăși mișcării (rotirii) curentului de gaz în interiorul aparatului. Ciclonul este format dintr-o manta cilindrică la partea superioară și conică la partea inferioară. Mantaua cilindrică este acoperită cu un capac srtăbătut de un tub central pentru ieșirea gazului purificat. La partea superioară a mantalei este prevăzut racordul de intrare a gazului de purificat; pentru a realiza intrarea tangențială a gazului, racordul prezintă un ajutaj care face trecerea de la secțiunea circulară a conductei la secțiunea dreptunghiulară de intrare în ciclon.

Cîmpul centrifugal în interiorul ciclonului se realizează datorită intrării tangențiale a gazului, cu viteza relativ mare, 10 . . . 20 m/s; gazul capătă o mișcare de rotație, elicoidală, coborînd către partea conică a ciclonului. În timpul acestei rotiri, datorită forței centrifuge care ia naștere, particulele

Scanned with OKEN Scanner

solide sînt îndreptate către peretele mantalei, unde sedimentează şi alunecă înspre deschiderea de evacuare. Gazul ajuns în partea inferioară a mantalei ciclonului se ridică în sus, continuîndu-şi mişcarea de rotaţie, formînd astfel un curent ascendent care antrenează şi o parte din curentul descendent de gaz din imediata vecinătate a axului.

Diametrul minim d_m al particulelor care mai sedimentează într-un ciclon cu raza R se calculează din relaţia:

$$d_m = 3\sqrt{\frac{\eta \cdot R}{2\pi \cdot n \cdot v \cdot \rho_1}}, \qquad (98)$$

în care: n reprezintă numărul de rotaţii efectuate de gaz pînă la depunerea particulelor; în general se consideră $n=1{,}5$.

Din ecuaţia (98) se observă că diametrul minim al particulelor sedimentate este cu atît mai mic, şi deci gradul de separare cu atît mai mare, cu cît raza ciclonului este mai mică. Din această cauză s-au construit cicloane cu diametre mici, 150—200 mm, care, pentru a permite separarea unor debite mari de gaze, sînt cuplate în paralel şi montate într-un corp comun, formînd baterii de cicloane.

Sedimentarea în cicloane permite realizarea unui grad de separare bun, în special pentru particule cu diametrul cuprins între 15 şi 200 mμ.

Cicloanele prezintă următoarele avantaje principale: simplitatea construcţiei datorită lipsei pieselor mobile; pierdere de presiune relativ redusă; posibilitate de lucru la temperaturi ridicate şi cu sisteme corosive; întreţinere uşoară.

Dezavantajele lor se referă în special la sensibilitatea faţă de variaţiile debitului şi la eroziunea pereţilor mantalei.

3) Separarea prin filtrare

Separarea sistemelor gazoase eterogene se realizează prin trecerea gazului printr-un material filtrant, sub formă de strat sau suprafaţă filtrantă, care lasă să treacă gazul şi reţine particulele solide aflate în suspensie.

Mai răspîndite în industria chimică sînt filtrele cu suprafeţe filtrante în formă de manşoane cilindrice, numite **filtre cu saci.** Un filtru cu saci (fig. 119, *a*) este format dintr-un număr mare de saci filtranţi montaţi într-un corp comun, grupaţi pe secţii care pot funcţiona independent. Sacii au deschis numai capătul inferior, prin care sînt fixaţi într-o placă tubulară comună; capătul superior, închis, este fixat pe un dispozitiv de scuturare. Un filtru cu saci este format din 3 pînă la 12 secţii, conţinînd fiecare cîteva zeci sau chiar sute de saci cu lungimea între 2 şi 9 m, avînd un diametru de 190—220 mm. Gazul de purificat intră la baza filtrului şi pătrunde prin placa tubulară în interiorul sacilor filtranţi; particulele solide sînt reţinute pe suprafaţa interioară a sacului, iar gazul purificat trece prin pînza filtrantă şi este evacuat din filtru. Pe măsură ce creşte grosimea stratului de praf depus pe suprafaţa filtrului rezistenţa la trecerea gazului creşte; de aceea sacii se scutură periodic cu ajutorul dispozitivului mecanic montat în partea superioară a filtrului. La unele filtre cu saci, concomitent cu scuturarea sacilor are loc şi o curăţare a acestora cu ajutorul unui curent de aer suflat

Scanned with OKEN Scanner

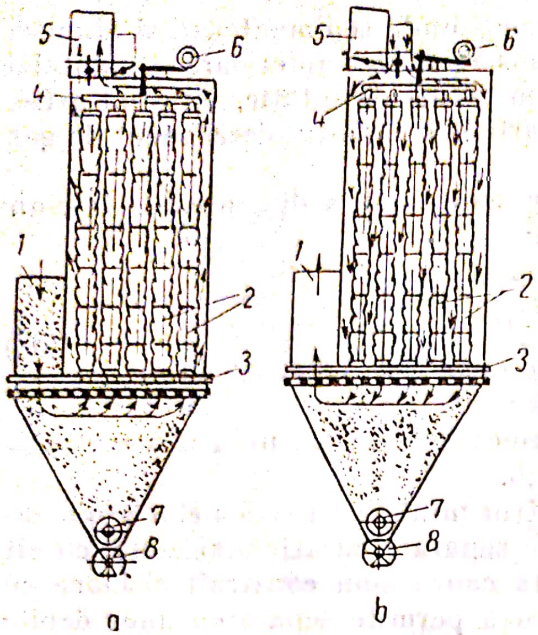


Fig. 119. Filtru cu saci:

a — filtrarea; *b* — scurtarea și curățirea; *1* — conducta de intrare a gazului; *2* — saci filtranți; *3* — placă tubulară; *4* — cadru de susținere a sacilor; *5* — conductă de ieșire a gazului; *6* — dispozitiv de scuturare; *7* — melc; *8* — închizător.

din exteriorul sacilor (curățire cu jet invers de gaz), așa cum se arată în figura 119, *b*; praful scuturat cade în partea conică a corpului filtrului, de unde este evacuat cu ajutorul unui melc.

Filtrele cu saci permit realizarea unui grad mare de separare a particulelor fine, care atinge 98—99%; dezavantajele lor se datoresc imposibilității utilizării pentru filtrarea gazelor fierbinți sau umede, precum și consumului de material filtrant.

4) Separarea prin procedee umede

Procedeele umede de separare se aplică atunci cînd gazul supus purificării poate fi umezit și răcit. iar particulele fazei disperse nu prezintă importanță. Aceste procedee urmăresc umezirea particulelor solide, mărindu-le astfel masa și dimensiunile; uneori umezirea are ca efect asocierea particulelor umezite, ușurînd astfel îndepărtarea lor din gaz. Particulele umezite pot fi separate din gaz fie în aparatul în care s-a realizat umezirea, fie într-un alt dispozitiv sub acțiunea forței gravitaționale sau centrifuge; se utilizează și separarea prin inerție. Umezirea gazului de separat are loc în utilaje care urmăresc realizarea unui contact cît mai bun între gaz și lichidul de spălare. Cele mai simple utilaje sînt **turnurile de spălare** numite și **scrubere.** Acestea sînt turnuri cilindrice, goale sau cu umplutură constituită din bucăți de cocs sau din umplutură de formă definită, în special inele Raschig.

Pentru realizarea unui grad de separare mare se utilizează spălătoarele centrifuge.

Pentru a asigura un contact cît mai bun între gazul brut și apa de spălare s-au realizat separatoarele cu spumă. La aceste utilaje, contactul între gaz și lichid se realizează prin barbotarea gazului cu viteze mari, 1,3—3 m/s, prin lichidul care se găsește pe un taler perforat; datorită vitezei mari a gazului, lichidul spumează reținînd suspensiile conținute în gaz.

5) Separarea electrică

Separarea electrică a sistemelor eterogene gazoase se realizează în utilaje speciale numite **filtre electrice,** în care gazul de purificat se ionizează sub influența unui cîmp electric neomogen, creat în spațiul dintre doi electrozi

de suprafeţe diferite; particulele solide sau lichide conţinute în gaz primesc sarcini electrice de la ionii rezultaţi şi, sub acţiunea cîmpului electric în care se găsesc, se deplasează către electrodul de sedimentare unde se depun. Particulele pot primi un număr important de sarcini electrice elementare, astfel încît viteza lor de sedimentare creşte foarte mult sub influenţa forţelor cîmpului electric.

Cîmpul electric neomogen se creează între doi electrozi, dintre care unul sub forma unui fir se găseşte dispus în axul unui tub cu secţiune circulară sau hexagonală; uneori electrozii filiformi sînt întinşi între suprafeţe plane ondulate.

În filtrele electrice, electrodul central (electrodul în formă de fir) numit *electrod de ionizare* este legat la polul negativ, iar electrodul tubular, numit *electrod de sedimentare*, la polul pozitiv.

Filtrele electrice sînt alimentate numai cu curent continuu, deoarece în cazul curentului alternativ particulele şi-ar schimba direcţia şi nu ar reuşi să sedimenteze; se lucrează cu curent continuu de înaltă tensiune (40—75 kV).

Tipuri de filtre electrice. După forma electrozilor, se deosebesc *filtre electrice cu electrozi coaxiali şi filtre electrice cu electrozi în plane paralele.*

Filtrele electrice cu electrozi coaxiali (fig. 120), numite **filtre tubulare,** sînt constituite dintr-o cameră verticală *1* în care sînt montaţi electrozii de sedimentare *2* în formă de tuburi cu secţiune circulară sau hexagonală. Electrozii de ionizare *3* sînt constituiţi din sîrme subţiri, coaxiali cu electrozii de sedimentare, prinşi în partea superioară la o ramă comună 4, bine izolată electric şi fixaţi în partea inferioară într-un cadru *5* care împiedică oscilaţiile în timpul funcţionării. Gazul de purificat, alimentat la partea inferioară a filtrului, este uniform distribuit de un grătar *6*, pătrunde în electrozii tubulari şi este evacuat prin partea superioară a filtrului; particulele solide sedimentate se adună în partea inferioară a filtrului, de unde sînt eva-

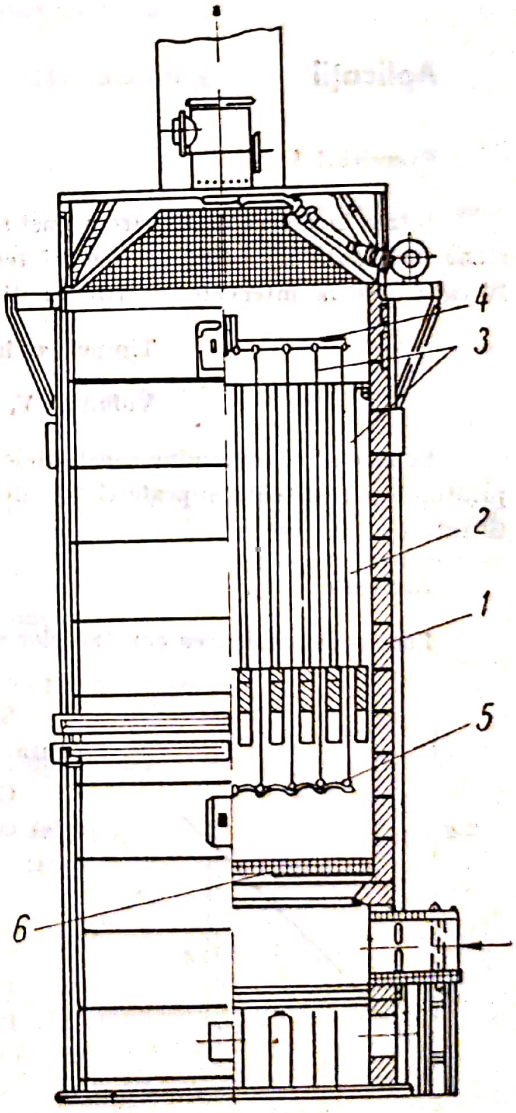


Fig. 120. Filtru electric tubular:
1 — cameră verticală; *2* — electrozi de sedimentare; *3* — electrod de ionizare; *4* — ramă de sprijinire; *5* — cadru de fixare; *6* — grătar de distribuţie.

Scanned with OKEN Scanner

cuate periodic. Unele construcţii de filtre electrice prevăd şi un dispozitiv de scuturare a electrozilor de precipitare.

Filtrele electrice cu electrozi în plane paralele au electrozii de sedimentare formaţi din table, grătare, ţesături de sîrmă, dispuşi paralel, între care sînt întinşi electrozii de ionizare din sîrme subţiri. Filtrele electrice cu electrozi în plane paralele pot fi verticale, cînd gazele le străbat de jos în sus şi orizontale — cu trecerea orizontală a gazelor.

Filtrele electrice asigură un grad foarte mare de separare, care poate atinge 99,9%, indiferent de dimensiunile particulelor sedimentate. În afară de aceasta, filtrele electrice prezintă o serie de avantaje, dintre care mai importante sînt: consum redus de energie, pierdere mică de presiune, uzură neînsemnată a aparaturii, insensibilitate faţă de temperatură, menţinerea căldurii gazelor. De aceea, filtrele electrice cunosc numeroase aplicaţii în separarea sistemelor eterogene gazoase întîlnite în industria chimică şi petrochimică.

Aplicaţii

Exerciţiul 1

Într-o încercare de filtrare a unei suspensii pe un filtru, cu suprafaţa $A=0{,}05$ m², la presiune constantă $\Delta p=49\,100$ N/m² şi temperatura 20°C, s-au obţinut următoarele volume de filtrat culese la intervale diferite de timp:

Timpul τ, în s	70	255	455	770
Volumul V, în l	10	20	30	40

Se cere să se determine constantele de filtrare a şi b, precum şi rezistenţa specifică a precipitatului şi rezistenţa suprafeţei filtrate. Se cunoaşte volumul precipitatului raportat la 1 m³ filtrat, $c=0{,}01$ m³/m³.

Rezolvare

Pentru determinarea constantelor se reprezintă grafic ecuaţia (94) scrisă sub forma:

$$\tau' q = a \cdot q + b$$

Se obţine o dreaptă a cărei ordonată la origine este b, panta ei fiind egală cu a.

Calculînd valorile lui q (volumul raportat la unitatea de arie) cu relaţia $q=V/A$ şi rapoartele τ/q se obţin rezultatele date:

q, în m³/m²	0,2	0,4	0,6	0,8
τ/q, în s m²/m³	350	562	758	962

Datele astfel obţinute sînt reprezentate grafic în figura 121. Din grafic rezultă următoarele valori pentru constantele de filtrare:

— ordonata la origine a dreptei obţinute, egală cu constanta b, are valoarea $b=150$ s/m;

— panta dreptei obţinute, egală cu constanta a,

$$a=\operatorname{tg}\alpha=\frac{A}{B}=\frac{962-150}{0{,}8}=1\,015 \text{ s/m}^3$$

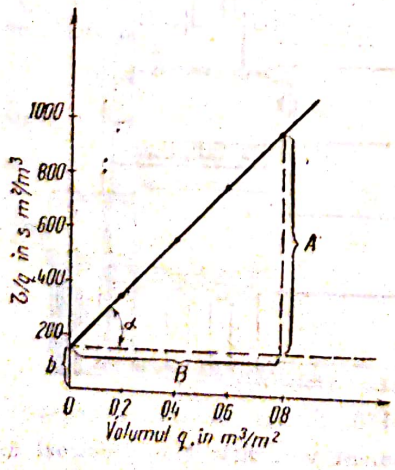


Fig. 121. Grafic ajutător pentru exerciţiul 1.

Scanned with OKEN Scanner

Rezistența specifică a precipitatului se determină din relația:

$$r = \frac{2a \cdot \Delta p}{c} = \frac{2 \times 1\,015 \times 49\,100}{0{,}01} = 9{,}95 \cdot 10^{8} \text{ N s/m}^3$$

Rezistența suprafeței filtrante R_s are valoarea:

$$R_s = b \cdot \Delta p = 150 \cdot 49\,100 = 7{,}36 \cdot 10^{6} \text{ N s/m}^3.$$

Exercițiul 2

Utilizînd constantele de filtrare din exemplul precedent, să se calculeze timpul necesar pentru obținerea a 5 m³ de filtrat pe un filtru cu o suprafață de filtrare $A = 10$ m², în urma filtrării unei suspensii apoase.

Rezolvare

Înlocuind valorile constantelor a și b și mărimile cunoscute, volumul de filtrat și aria filtrului, în ecuația (94) pentru timpul de filtrare se obține valoarea:

$$\tau = 1\,015\left(\frac{5}{10}\right)^2 + 150\left(\frac{5}{10}\right) = 254 + 75 = 329 \text{ s.}$$

Exercițiul 3

Precipitatul obținut în filtrarea executată în condițiile exemplului precedent se spală cu 2 m³ apă la 30°C; filtrarea a decurs la 20°C. Se cere să se determine durata spălării.

Rezolvare

Se determină mai întîi viteza de filtrare, cu ajutorul ecuației (95):

$$w_f = \frac{1}{2a \cdot q + b} = \frac{1}{2 \times 1\,015 \dfrac{5}{10} + 150} = \frac{1}{1\,175} = 8{,}6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s.}$$

Deoarece spălarea se face la altă temperatură, viteza de spălare se calculează cu ecuația $\omega_s = \omega_f \dfrac{\eta_f}{\eta_s}$. Din tabele se găsesc valorile viscozităților: $\eta_f = 1$ cP și $\eta_s = 0{,}8$ cP, pentru apă la temperaturile de 20°C și respectiv 30°C. Înlocuind, se obține:

$$w_s = w_f \frac{\eta_f}{\eta_s} = 8{,}6 \times 10^{-4} \frac{0{,}8}{1} = 1{,}075 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s.}$$

Timpul necesar perioadei de spălare se calculează din relația:

$$\tau_s = \frac{q_s}{w_s} = \frac{2/10}{1{,}075 \cdot 10^{-5}} = 186 \text{ s.}$$

Verificarea cunoștințelor

1. Definiți operația de sedimentare și enumerați factorii principali de care depinde.
2. Descrieți, din punct de vedere constructiv și funcțional, decantorul cu brațe.
3. Definiți viteza de filtrare și enumerați factorii de care depinde.
4. Descrieți etapele principale ale filtrării cu ajutorul filtrelor presă.
5. Descrieți constructiv și funcțional filtrul celular cu tambur rotativ.
6. Ce se înțelege prin factor de eficacitate la centrifugare?
7. Care sînt elementele constitutive principale ale unei centrifuge filtrante?
8. Comparați funcționarea centrifugelor filtrante continue și discontinue.

Scanned with OKEN Scanner

9. Explicați intensificarea operației de sedimentare prin efectuarea sa într-un cîmp de forțe centrifuge.
10. Enumerați procedeele de separare a sistemelor gazoase eterogene.
11. Descrieți funcționarea unui filtru electric.

4. AMESTECAREA MATERIALELOR

În industria chimică intervine foarte frecvent necesitatea amestecării a două sau mai multe materiale, în vederea obținerii unor sisteme omogene sau eterogene, sau pentru intensificarea operațiilor fizice sau chimice.

Deși termenul de amestecare caracterizează operația în general se utilizează, de obicei, pentru amestecarea solidelor în utilaje numite **amestecătoare**. Pentru amestecarea lichidelor sau a lichidelor cu solide se utilizează termenul de *agitare*. În cazul amestecării unor fluide cu viscozitate mare sau a pastelor se folosește termenul de *malaxare*; aparatele în care se realizează operațiile se numesc **agitatoare** și respectiv **malaxoare.**

Operația de amestecare se caracterizează *tehnologic*, prin eficacitatea de amestecare, și *economic*, prin puterea consumată.

Eficacitatea amestecării și puterea consumată depind de condițiile de lucru și de proprietățile materialelor care se amestecă.

Dintre condițiile de desfășurare a operației, o importanță deosebită o au următoarele: tipul amestecătorului, funcționarea (continuă sau discontinuă), mărimea șarjelor sau a debitelor, durata amestecării etc. În ceea ce privește proprietățile materialelor, pentru lichide prezintă importanță: viscozitatea, densitatea, densitatea relativă și miscibilitatea, iar pentru solide: finețea și forma particulelor, densitatea, densitatea relativă, umectabilitatea.

Metodele și aparatele de amestecare se aleg ținînd seama de factori enumerați, în funcție de scopul urmărit prin operația de amestecare.

a. Tipuri de amestecătoare

Utilajele pentru realizarea amestecării pot funcționa continuu sau discontinuu. De obicei, gazele și lichidele cu viscozitate mică sînt omogenizate în aparate continue, iar fluidele foarte vîscoase sau pastele în malaxoare discontinue.

1) Amestecătoare cu brațe

Dispozitivul de agitare la aceste amestecătoare este constituit dintr-un ax vertical pe care sînt montate două sau mai multe brațe dreptunghiulare drepte sau înclinate față de orizontală. În figura 122 este reprezentată schema unui amestecător cu două brațe montate la capătul axului vertical;

Amestecătoarele cu brațe pot fi utilizate fie ca agitatoare — pentru omogenizarea fluidelor — fie ca malaxoare — pentru paste.

Pentru o mai bună agitare a întregii mase de lichid, pe arbore se montează mai multe brațe orizontale, uneori formînd un cadru prin unirea lor cu bra-

Scanned with OKEN Scanner

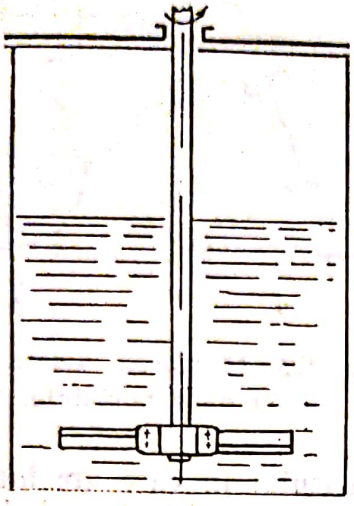


Fig. 122. Schema unui amestecător cu braţe.

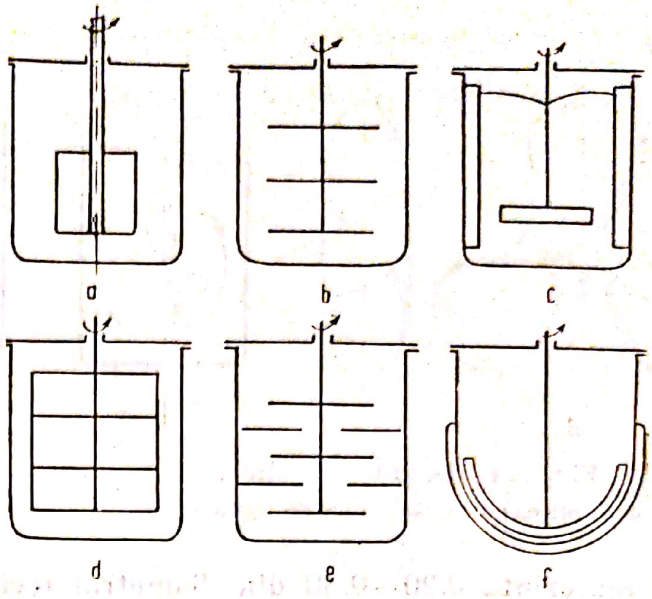


Fig. 123. Tipuri principale de agitatoare cu braţe:

a — cu paletă dreptunghiulară; *b* — cu braţe perpendiculare pe arbori; *c* — cu braţe şi şicane verticale; *d* — în formă de cadru; *e* — cu braţe staţionare (şicane orizontale); *f* — ancoră.

ţele verticale — figura 123, poziţiile *b* şi *d*. Pentru agitarea unor fluide vîscoase, în special în vasele prevăzute cu manta de încălzire sau răcire, pentru a împiedica aderarea materialului la pereţii vasului se utilizează agitatoare ancoră (fig. 123, *f*) la care braţele sînt curbate după forma vasului. Agitatoarele cu braţe sînt recomandabile pentru amestecarea fluidelor cu viscozitate mică (pînă la 10 cP). Pentru fluide a căror viscozitate depăşeşte 2 500 cP se recomandă agitatoarele cu formă de cadru sau cu şicane verticale.

Pentru omogenizarea şi frămîntarea pastelor se utilizează malaxoare ale căror braţe au formă de *Z* sau Σ rotite de cîte doi arbori.

Avantajele agitatoarelor din această categorie se referă la simplitatea construcţiei şi la costul redus de realizare; sînt deosebit de indicate pentru fluide cu viscozitate nu prea mare. Neajunşurile lor se referă la eficacitatea mică de amestecare în cazul fluidelor vîscoase; nu pot fi utilizate la omogenizarea unor lichide nemiscibile cu diferenţă mare între densităţi.

2) Agitatoare cu elice

Agitatoarele din această categorie au montat pe arborele vertical o elice cu două sau trei palete cu înclinaţie variabilă (fig. 124); lîngă ax acestea sînt aproape orizontale, înclinaţia crescînd apoi treptat pînă la 90° la capătul paletei. Forma paletelor şi sensul de rotire sînt astfel alese încît să se producă o ridicare a lichidului în regiunea de lîngă arbore, realizîndu-se circulaţia lichidului. Cînd pe ax sînt montate două elice, ele sînt astfel construite încît să producă o împingere a lichidului în sensuri opuse. Diametrul paletelor

Scanned with OKEN Scanner

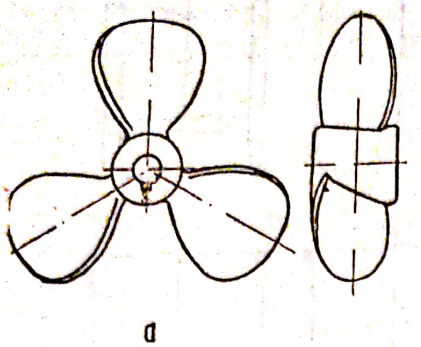


Fig. 124. Agitator cu elice:
a — elicea; *b* — acțiunea de agitare.

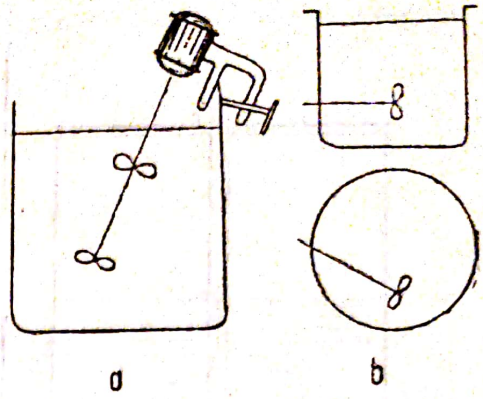


Fig. 125. Montarea agitatoarelor cu elice portabile.

elicei reprezintă 0,20—0,30 din diametrul recipientului în care are loc agitarea; turația agitatoarelor cu elice variază între 150—1 500 rot/min ele putînd fi cuplate direct la un motor electric.

Agitatoarele cu elice se montează de obicei excentric în recipient; agitatoarele portabile sînt prevăzute cu un dispozitiv de prindere și fixare de marginea recipientului ca în figura 125, *a*. Agitatoarele cu elice se pot monta și lateral în recipiente; în acest caz arborele agitatorului trece prin peretele recipientului (fig. 125, *b*); se recomandă, mai ales la montarea mai multor agitatoare în același recipient, ca arborele agitatorului să nu fie montat în direcție radială.

Agitatoarele cu elice sînt indicate pentru omogenizarea lichidelor cu viscozitate sub 4 000 cP și pentru obținerea emulsiilor și suspensiilor. Se caracterizează printr-o agitare intensivă, la un consum de energie moderat chiar la turații mari.

3) Agitatoare turbină

Dispozitivele de agitare ale acestor agitatoare constau din unul sau mai multe rotoare de construcție foarte asemănătoare cu rotoarele pompelor centrifuge, montate pe un arbore vertical. Principiul de funcționare al lor este asemănător cu cel al pompelor centrifuge: rotoarele aspiră bilateral (central) lichidul în care sînt afundate și-l distribuie către periferia recipientului. Ca și rotoarele pompelor centrifuge, rotoarele agitatoarelor turbină pot fi deschise sau închise. Cele deschise (fig. 126, *a*) sînt niște discuri pe care se fixează un număr de patru pînă la 16 palete plane sau curbate diferit și dispuse radial. Rotoarele închise, asemănătoare celor de la pompele centrifuge (fig. 126, *b*), sînt prevăzute cu un dispozitiv de dirijare a lichidului, statorul, care, în acest caz, nu mai dirijează lichidul tangențial ca la pompele centrifuge, ci radial, pentru a crea o turbulență cît mai mare lichidului. Curenții radiali de lichid care se formează au o viteză suficient de mare pentru a se răspîndi în întreaga secțiune a recipientului, mărind astfel acțiunea de agitare locală. Domeniile de utilizare a agitatoarelor turbină se referă la omogenizarea lichidelor cu viscozitate mică sau medie, care poate atinge 10^5 cP, la obținerea unor dispersii fine și la dizolvări rapide. Calitățile lor constau în asigurarea

Scanned with OKEN Scanner

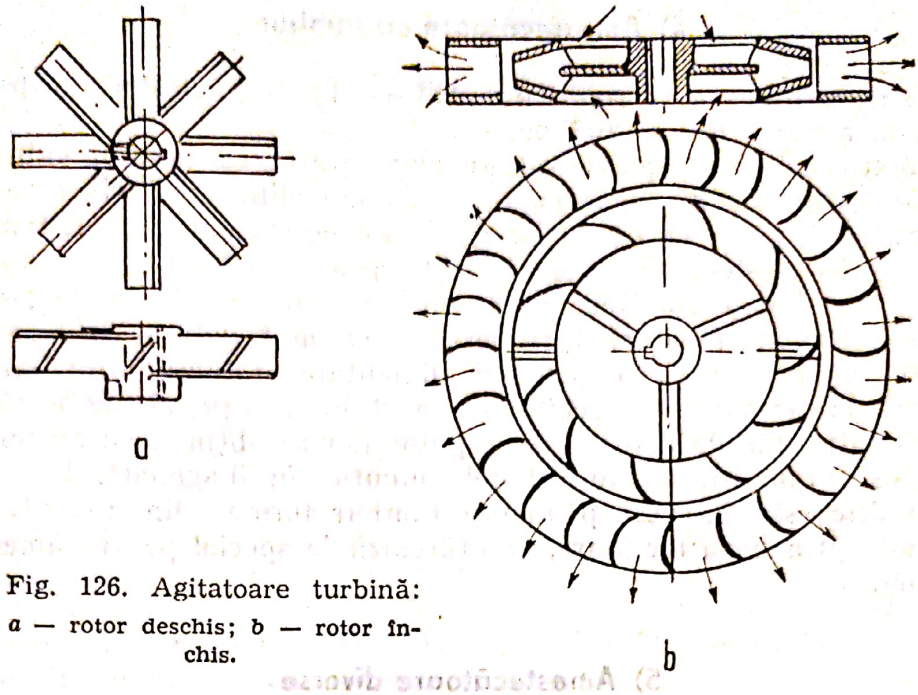


Fig. 126. Agitatoare turbină:
a — rotor deschis; *b* — rotor închis.

unor eficacităţi mari de omogenizare, în intervale reduse de timp şi în posibilitatea utilizării lor în procese continue. Neajunsurile lor se referă la construcţia relativ complicată, necesitînd un cost de realizare relativ ridicat

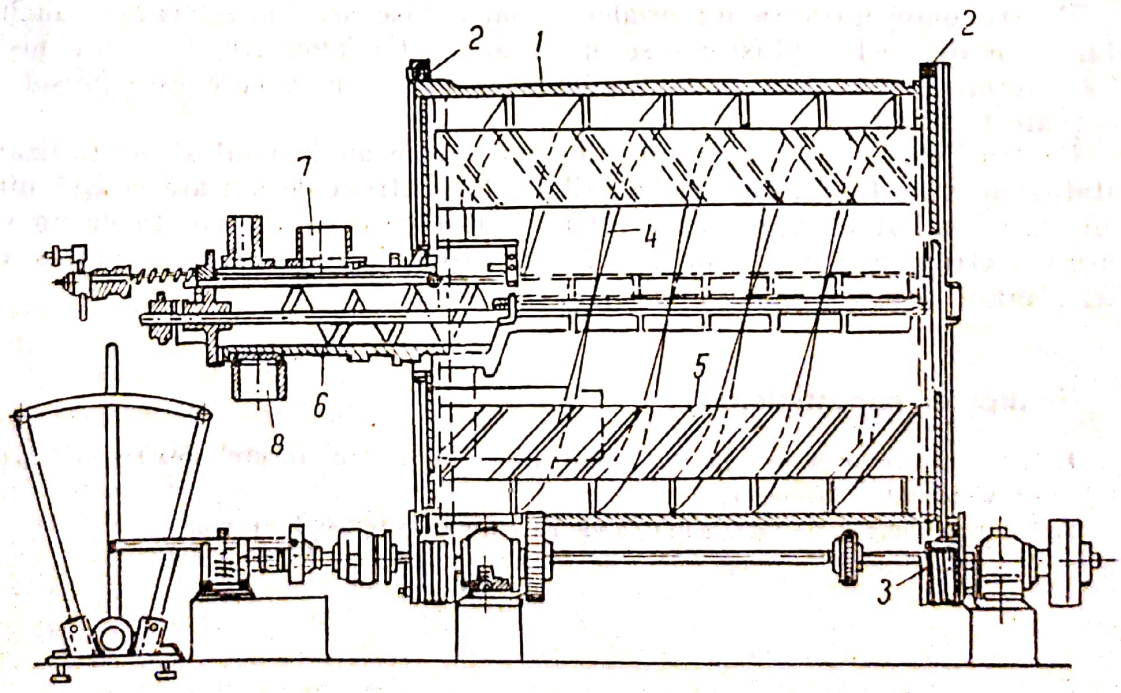


Fig. 127. Amestecător cu tambur cilindric:
1 — tambur; *2* — bandaje; *3* — role; *4* — palete elicoidale; *5* — pereţi despărţitori; *6* — transportor melc; *7* — încărcare; *8* — descărcare.

Scanned with OKEN Scanner

4) Amestecătoare cu tambur

Amestecătoarele cu tambur sînt utilizate pentru amestecarea pulberilor sau, uneori, a pulberilor cu lichide.

În figura 127 este reprezentat un amestecător cu tambur cilindric orizontal; tamburul este prevăzut cu niște bandaje din fontă prin care se sprijină pe rolele de antrenare prin fricțiune. Pe pereții interiori ai tamburului sînt fixate niște palete elicoidale și niște șicane înclinate; datorită acestei construcții are loc o amestecare energică a materialului în timpul rotirii tamburului. Pentru încărcarea și descărcarea materialului se folosește un transportor melc montat în gîtul de alimentare al tamburului, iar pentru descărcarea materialului se schimbă sensul de rotație al tamburului.

Eficacități bune de amestecare a pulberilor se obțin și cu ajutorul unor amestecătoare tambur, avînd arborele montat în diagonală. Uneori tamburul cilindric este înlocuit printr-un tambur format din două trunchiuri de con unite prin baza lor mare; se utilizează în special pentru amestecarea discontinuă.

5) Amestecătoare diverse

Pentru amestecarea lichidelor cu viscozitate mică se utilizează uneori *agitarea cu aer, abur sau cu alte gaze.* Agitarea se realizează prin introducerea gazelor sub presiune, în lichidul care trebuie omogenizat. Gazele sau vaporii se pot introduce în lichidul de omogenizat, fie prin conducte prevăzute cu orificii, montate la baza recipientului de agitare, fie cu ajutorul duzelor și injectoarelor.

Pentru omogenizarea materialelor foarte vîscoase (amestecarea cauciucului, a materialelor plastice) se utilizează *calandrele.* Acestea sînt niște utilaje formate din doi cilindri încălziți cu abur, între care este presat și omogenizat materialul.

Pentru lichide cu viscozitate mică sau medie au început să fie utilizate agitatoarele vibratoare. La aceste utilaje dispozitivul de agitare constă dintr-un disc bombat prevăzut cu orificii, montat pe o tijă acționată de un vibrator electromagnetic; datorită vibrării discului, lichidul este împins cu viteză mare prin orificiile acestuia.

Verificarea cunoștințelor

1. Enumerați principalele tipuri de agitatoare cu brațe. Indicați utilizarea lor în funcție de viscozitatea lichidelor.
2. Faceți o comparație între agitatoarele cu elice și agitatoarele turbină.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul V

OPERAȚII TERMICE

Operațiile termice constituie una dintre cele mai importante grupe de operații întîlnite în industria chimică și petrochimică; se poate afirma că nu există ramură a acestor industrii în care să nu apară probleme legate de încălzirea sau răcirea utilajelor, reactanților sau materiilor finite. Operațiile termice — *încălzirea, răcirea, evaporarea, condensarea* — constituie o parte importantă a multor procese tehnologice, favorizînd atît dezvoltarea reacțiilor chimice, cît și desfășurarea altor operații fizice; operații cum sînt distilarea, rectificarea, uscarea, sublimarea etc., nu se pot desfășura în afara efectelor termice de încălzire sau răcire.

1. TRANSMITEREA CĂLDURII ÎN UTILAJELE INDUSTRIEI CHIMICE ȘI PETROCHIMICE

Utilajele în care se desfășoară operațiile chimice sau fizice însoțite de efecte termice necesită introducerea sau evacuarea căldurii prin încălzire sau răcire, în vederea menținerii regimului de temperatură necesar desfășurării operațiilor respective; uneori intervine necesitatea păstrării căldurii dezvoltate, care se realizează prin izolarea termică a utilajului respectiv.

a. Bazele transmiterii căldurii

Transmiterea căldurii între două corpuri se poate produce spontan, dacă între acestea există o diferență de temperatură, transmiterea făcîndu-se de la corpul cu temperatură mai mare către corpul cu temperatură mai mică. Deci, forța motrice a operațiilor termice o constituie diferența de temperatură. Ținînd seama de aceasta, transmiterea căldurii poate fi definită ca un transport de energie termică sub acțiunea diferenței de temperatură dintre două corpuri sau două sisteme. Transmiterea căldurii de la un corp la altul are loc prin trei moduri: prin *conducție*, prin *convecție* și prin *radiație*.

Transmiterea căldurii prin conducție se realizează printr-un mecanism molecular: moleculele cu energie cinetică mai mare, și deci cu viteză mare (cărora le corespunde o temperatură mai ridicată), se ciocnesc cu moleculele vecine, cu viteză mai mică, transmițîndu-le o parte din energia lor cinetică. Căldura se transmite astfel prin masa corpului din aproape în aproape, de la o particulă la alta, fără deplasare de substanță, pînă la egalizarea temperaturii. *Transmiterea prin conducție are loc numai într-un mediu imobil; de aceea, acest mod de transmitere a căldurii este caracteristic corpurilor solide.*

Scanned with OKEN Scanner

Transmiterea căldurii prin convecție are loc ca urmare a deplasării relative a unor porțiuni de fluid în întreaga masă a acestuia, formînd curenții de convecție. Se deosebește *convecția naturală*, cînd curenții de convecție se formează datorită deplasării relative a unor porțiuni de fluid, sub acțiunea unor diferențe de densitate rezultate din diferențe de temperatură, și *convecția forțată*, cînd curenții respectivi sînt formați de un mijloc mecanic (pompă sau agitator). Transmiterea căldurii prin convecție este întotdeauna însoțită de conducție.

Transmiterea căldurii prin radiație apare ca un transport de energie sub formă de unde electromagnetice. În acest caz, energia termică se transformă în energie radiantă (radiație), se transportă (transmite) sub această formă pînă la corpul de încălzit unde se transformă din nou în energie termică (absorbția).

Cele trei moduri de transmitere a căldurii se întîlnesc foarte rar individual; de obicei căldura se transmite simultan prin două (conducția și convecția) sau prin toate cele trei moduri.

1) Transmiterea căldurii prin conducție

În transmiterea căldurii prin conducție o importanță deosebită o are distribuția temperaturilor în corpul sau sistemul considerat. Distribuția temperaturilor sau cîmpul de temperatură poate fi reprezentată printr-o funcție de loc (coordonatele x, y, z) și de timp; în regim staționar dispare dependența de timp. *Variația temperaturii într-o direcție considerată se caracterizează prin* **gradientul de temperatură dt/dn,** care se exprimă printr-o diferență de temperatură pe unitatea de lungime.

Conform legii lui Fourier, căldura transmisă prin conducție, în unitatea de timp, este proporțională cu aria suprafeței, considerată perpendicular pe curentul de căldură, și cu gradientul de temperatură:

$$Q = -\lambda \cdot A \frac{dt}{dn}, \qquad (99)$$

în care:

Q este căldura transmisă în unitatea de timp, în kcal/h sau în W;

λ — conductivitatea termică.

Semnul minus indică transmiterea căldurii în sensul descreșterii temperaturii.

Considerînd un perete plan de grosime δ și arie A, avînd pe una din fețe temperatura t_1 iar pe cealaltă temperatura t_2 (fig. 128), diferența de temperatură (forța motrice), numită uneori și cădere de temperatură datorită căreia are loc transmiterea căldurii se notează cu $\Delta t = t_1 - t_2$.

Deoarece căldura se transmite numai într-o singură direcție x, pornind de la legea lui Fourier se ajunge la ecuația generală a transmiterii căldurii prin conducție:

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} = \lambda \cdot A \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{\gamma}{\delta} A \cdot \Delta t. \qquad (100)$$

$$\boxed{Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta t,}$$

Scanned with OKEN Scanner

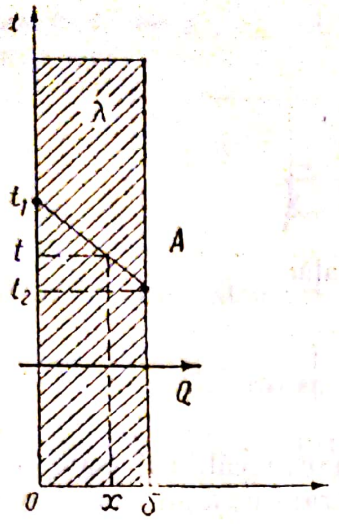


Fig. 128. Transmiterea căldurii prin conducție printr-un perete.

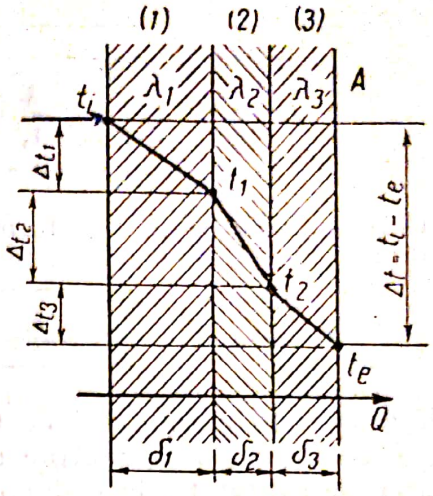


Fig. 129. Transmiterea căldurii prin straturi paralele.

Particularizarea sa pentru alte cazuri decît cel studiat se face prin definirea ariei A prin care are loc transmiterea căldurii și a diferenței de temperatură Δt cînd temperaturile pe cele două fețe t_1 și t_2 nu au o valoare constantă pentru toată suprafața peretelui. De obicei se lucrează cu valori medii ale acestor mărimi, A_m și t_m, metoda de mediere, aritmetică sau logaritmică, depinzînd de forma suprafeței prin care are loc transmiterea căldurii și de variația temperaturii. *Diferența de temperatură între fațetele unui perete se mai numește și* **cădere de temperatură.**

Conductivitatea termică λ variază cu temperatura, însă pentru diferențe de temperatură Δt nu prea mari se poate considera constantă.

Conductivitatea termică are valori mari pentru metale și mici pentru gaze. Impuritățile metalelor reduc foarte mult valoarea conductivității termice, umiditatea crește mult conductivitatea termică a materialelor, iar aerul în materiale poroase o reduce; la temperatura de 20°C, $\lambda = 0{,}60$ J/m · s · grd pentru apă și $\lambda = 0{,}023$ J/m · s · grd pentru aer.

Transmiterea căldurii printr-un perete format din mai multe straturi paralele. În figura 129 s-a reprezentat un perete format din trei straturi paralele, avînd pe cele două fețe ale sale temperaturile t_i și t_e; grosimile, conductivitățile termice și diferențele de temperatură pentru fiecare strat sînt cele notate pe figură; diferența de temperatură (căderea totală) între cele două fețe ale peretelui $\Delta t = t_i - t_e$ reprezintă suma căderilor de temperatură în fiecare din cele trei straturi. Deoarece prin fiecare din cele trei straturi considerate, avînd aria A, trece aceeași cantitate de căldură Q (regim staționar), se poate scrie:

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} A \cdot \Delta t_1; \qquad Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} A \cdot \Delta t_2; \qquad Q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} A \cdot \Delta t_3, \tag{101}$$

Sau adunînd căderile de temperatură în cele trei straturi, se obține:

$$\Delta t = \frac{Q}{A}\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right) = Q \cdot R. \tag{102}$$

Dacă se notează:

$$K=\frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}}, \tag{103}$$

ecuaţia (102) se poate scrie sub forma generală:

$$Q=K\cdot A\cdot \Delta t, \tag{104}$$

în care K este coeficientul total de transmitere a căldurii (sau de transfer termic) prin conducţie, reprezentînd căldura transmisă în unitatea de timp, prin unitatea de suprafaţă, la o diferenţă de temperatură egală cu un grad; unităţile acestuia sînt $J/m^2\cdot s\cdot grd$ ($W/m^2\cdot grd$) sau $kcal/m^2\cdot h\cdot grd$.

Temperaturile dintre straturi se determină cu relaţiile:

$$t_1=t_i-\delta_1\frac{K}{\lambda_1}\Delta t. \tag{105}$$

$$t_2=t_1-\delta_2\frac{K}{\lambda_2}\Delta t \quad \text{sau} \quad t_2=t_e+\delta_3\frac{K}{\lambda_3}\Delta t \tag{106}$$

Pentru un perete format din n straturi paralele, ecuaţia pentru calculul coeficientului K se generalizează sub forma:

$$K=1\Big/\sum_1^n\frac{\delta_i}{\lambda_i}; \tag{107}$$

Transmiterea căldurii prin cilindri cu pereţi groşi. Aşa cum rezultă din figura 130, aria A prin care se transmite căldura, prin pereţii cilindrului, nu este definită. Se demonstrează, în acest caz, că ecuaţia generală (100) este valabilă dacă se înlocuieşte aria A printr-o arie A_m reprezentînd media logaritmică a celor două arii A_i şi A_e:

$$Q=\frac{\lambda}{r_i-r_e}2\cdot\pi\cdot l\frac{r_e-r_i}{\ln\frac{r_e}{r_i}}(t_i-t_e)=\frac{\lambda}{\delta}2\pi r_m l\Delta t=\frac{\lambda}{\delta}A_m\cdot\Delta t \tag{108}$$

Atunci cînd raportul celor două raze este mai mic decît 2 se poate înlocui media logaritmică prin media aritmetică a celor două raze. Se poate lucra şi cu diametrul mediu d_m; în acest caz, aria medie are expresia $A_m=\pi\cdot l\cdot d_m$.

Pentru un perete cilindric format din n straturi de grosime δ_i şi avînd conductivitatea termică λ_i, se determină pentru fiecare strat în parte razele

Scanned with OKEN Scanner

sau diametrele medii, r_{mt} și d_{mt} și se calculează căldura transmisă cu una din formulele:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\sum_{t}^{n} \frac{\delta_t}{\lambda_t \cdot r_{m,t}}} \Delta t = \frac{\pi \cdot l}{\sum_{t}^{n} \frac{\delta_t}{\lambda_t \cdot d_{m,t}}} \Delta t. \qquad (109)$$

Temperaturile între straturi se determină, ca și în cazul pereților plani.

2) Transmiterea căldurii prin convecție

Transmiterea căldurii prin convecție este condiționată de deplasarea particulelor de fluid, adică de o deplasare sau transport de substanță. Intensitatea operației crește cu intensitatea deplasării fluidului (curenții de convecție, agitare, pompare), adică este puternic influențată de condițiile hidrodinamice de desfășurare. Convecția este întotdeauna însoțită de conducție; ponderea convecției este cu atît mai mare cu cît deplasarea fluidului este mai intensă. Mișcarea sau deplasarea fluidului într-o direcție definită (caracterizată prin viteza de curgere) sau relativă (curenți de convecție, turbioane) depind atît de construcția aparatului cît și de natura fizică a fluidului. În figura 131 s-a încercat să se reprezinte schematic procesul complex de transfer de căldură de la un fluid cald *1* la un perete cu fețe plane paralele și de la acesta la un fluid rece *2*.

În figura 131 s-au considerat, de o parte și de alta a peretelui solid, cele două straturi limită *1* și *2* în care viteza descrește foarte repede, ajungînd la zero lîngă perete.

Întreaga rezistență la transferul termic va fi concentrată în straturile limită *1* și *2*. Deoarece în aceste straturi transferul termic are loc atît prin convecție cît și prin conducție, pentru a exprima căldura transmisă se utilizează ecuația generală (100) în care raportul λ/δ se înlocuiește prin mărimile α_1 și α_2, care reprezintă coeficienții parțiali de transfer termic (de transmitere a căldurii) în straturile limită respective. În acest mod, căldura transmisă de

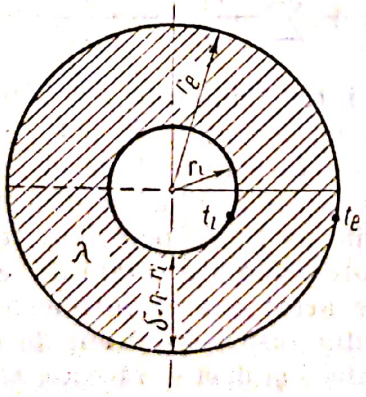


Fig. 130. Conducție prin-tr-un cilindru cu pereți groși.

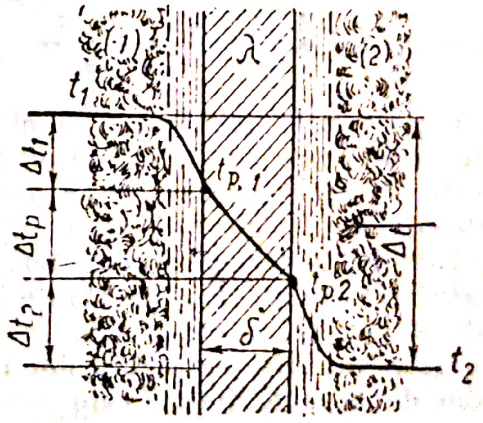


Fig. 131. Transmiterea căldurii de la un fluid cald la unul rece.

Scanned with OKEN Scanner

la un fluid avînd temperatura t_f prin stratul limită format în apropierea unei suprafețe solide cu temperatura t_p se poate exprima prin ecuația generală:

$$\boxed{Q=\alpha \cdot A(t_f-t_p).} \tag{110}$$

Ținînd seama de aceasta, precum și de ecuația obținută pentru transmiterea căldurii printr-un perete cu trei straturi (104), transmiterea căldurii prin convecție și conducție prin cele două straturi limită și prin peretele solid se poate exprima prin relațiile:

$$\boxed{Q=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}} A \cdot \Delta t=K \cdot A \cdot \Delta t,} \tag{111}$$

în care coeficientul total de transmitere a căldurii se exprimă prin relația:

$$K=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}}, \tag{112}$$

După cum se observă, coeficientul parțial de transfer termic α are aceleași unități de măsură ca și coeficientul total K.

În cazul cînd peretele este format din mai multe straturi se aplică ecuația generală $Q=K \cdot A \cdot \Delta t$. Valoarea coeficientului total K se determină cu ajutorul ecuației:

$$K=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\sum_{1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}+\frac{1}{\alpha_2}}, \tag{113}$$

care, pentru transmiterea căldurii prin convecție și conducție printr-un cilindru cu peretele format din mai multe straturi ia forma:

$$Q=\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_i}+\sum_{1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot r_{m.i}}+\frac{1}{\alpha_2 \cdot r_e}}\Delta t=\frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_i}+\sum\frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot d_{m.i}}+\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_e}}\Delta t \tag{114}$$

În aceste relații Δt reprezintă diferența între temperaturile celor două fluide între care are loc transferul de căldură, iar mărimile δ_i și λ_i, grosimea și respectiv conductivitatea straturilor din care este format peretele.

Diferența medie de temperatură. În toate ecuațiile pentru calculul transmiterii de căldură, s-a considerat că temperaturile pe fețele pereților, respectiv temperaturile fluidelor, sînt constante și ca atare diferența totală de temperatură este de asemenea constantă. În realitate acest caz se întîlnește foarte rar, deoarece variația temperaturilor rezultă din însăși schimbul de căldură dintre cele două fluide: fluidul cald cedează căldură și deci se răcește, temperatura sa scade, iar lichidul rece primește căldură, se încălzește, deci temperatura sa crește.

În figura 132 este reprezentată variația temperaturilor fluidelor, precum și a diferențelor de temperatură dintre acestea, în lungul schimbătoarelor de

Scanned with OKEN Scanner

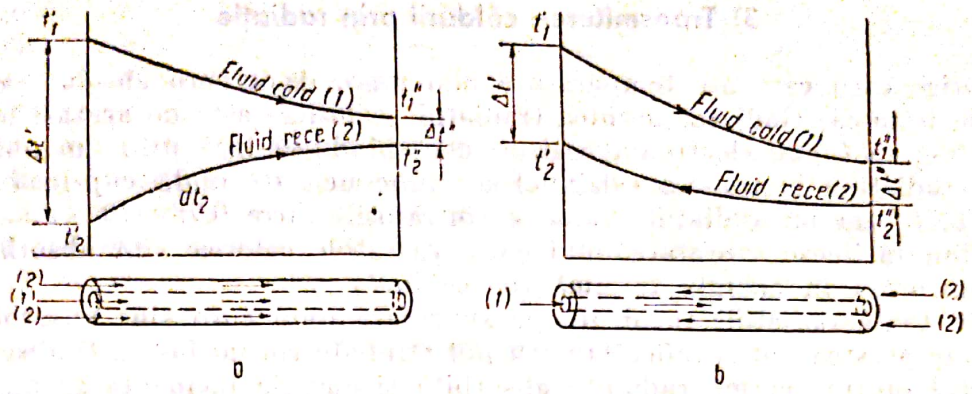


Fig. 132. Variația temperaturilor în lungul schimbătoarelor de căldură:
a — în curent paralel; *b* — în contracurent.

căldură pentru curent paralel, poziția *a*, și pentru contracurent, poziția *b*. Utilajele considerate (schimbătoarele de căldură) sînt formate din două țevi coaxiale prin care curg cele două fluide între care are loc schimbul (transferul) de căldură. Trebuie menționat că, în cazurile considerate, temperatura variază numai în spațiu (în fiecare punct aceasta rămîne constantă în timp) și deci transferul de căldură decurge în regim staționar. În acest caz, căldura transmisă, ținînd seama de notațiile din figura 132, se calculează cu relația:

$$Q = KA\frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln\frac{\Delta t''}{\Delta t'}} = KA\frac{\Delta t'' - \Delta t'}{2{,}3\lg\frac{\Delta t''}{\Delta t'}} = KA\cdot\Delta t_m \qquad (115)$$

în care Δt_m reprezintă media logaritmică a diferențelor de temperatură la cele două capete ale schimbătorului ($\Delta t'' = t_1'' - t_2''$ și $\Delta t' = t_1' - t_2'$).

Dacă transmiterea de căldură este însoțită de schimbarea stării fizice a fluidelor — fierberea lichidelor și condensarea vaporilor, fluidele care-și schimbă starea fizică cedează sau primesc căldura latentă, temperatura lor rămînînd constantă în timpul desfășurării operației. În acest caz, valorile coeficienților parțiali de transfer caloric sînt mult mai mari decît convecția obișnuită.

Pentru determinarea valorilor coeficientului α se recurge la determinări experimentale sau se utilizează diferite formule de calcul.

Pentru unele calcule prealabile, se pot folosi valori ale coeficientului α cuprinse în tabele speciale care se găsesc în literatura tehnică de specialitate; cîteva valori orientative ale coeficientului parțial de transfer termic α, exprimate în W/m² grd (J/m²s · grd), pentru cazuri mai des întîlnite în practică, sînt date mai jos:

— încălzirea și răcirea gazelor . . . . . 10— 70;
— încălzirea și răcirea lichidelor organice . . . . . 50— 1 000;
— încălzirea și răcirea apei . . . . . 200—10 000;
— apa în fierbere . . . . . 1 000—10 000;
— condensarea vaporilor de apă . . . . . 5 000—15 000;
— condensarea vaporilor de lichide organice . . . . . 500— 2 000;

Scanned with OKEN Scanner

3) Transmiterea căldurii prin radiație

Orice corp care are temperatura mai mare decît zero absolut radiază energie termică. Radiația termică (radiațiile calorice) este de aceeași natură ca și lumina (unde electromagnetice), deosebindu-se însă prin lungimea de undă; radiațiile luminoase (vizibile) au lungimea de undă cuprinsă între 0,35—0,78 μm iar radiațiile calorice (infraroșii) între 0,78—40 μm.

Cînd întîlnesc suprafața unui corp, radiațiile calorice sînt absorbite și se transformă în energia termică (în căldură).

Nu toate radiațiile incidente pe suprafața unui corp sînt absorbite, o parte din acestea pot fi reflectate sau pot străbate corpul fără a fi absorbite. Raportul dintre energia radiantă absorbită și energia incidentă se numește *coeficient de absorbție* și se notează cu a. Corpul care absoarbe toată energia radiantă incidentă se numește *corp negru absolut*; un asemenea corp are coeficientul de absorbție $a=1$.

Legea lui Kirchhoff stabilește legătura între puterea de emisie (radiație) și cea de absorbție a unui corp oarecare. Conform legii lui Kirchhoff coeficientul a de absorbție al unui corp oarecare este egal cu coeficientul său de emisie, notat cu ε. Corpurile pentru care egalitatea $a=\varepsilon$ este valabilă la orice temperatură și pentru toate lungimile de undă considerate se numesc *corpuri cenușii absolute*. În calcule se consideră drept corpuri cenușii absolute toate corpurile care se întîlnesc mai des în tehnică.

Coeficienții de emisie ai corpurilor depind de natura fizică a corpului și de starea suprafeței sale; corpurile cu suprafețe lucioase au coeficienți de emisie mici. Pentru cîteva materiale, valorile coeficientului ε sînt următoarele: fonta oxidată: 0,96; oțel inoxidabil 0,64—0,76; aluminiu: 0,11—0,19; argint lustruit în foi: 0,019—0,032; cărămidă refractară: 0,8—0,9; vopsea cu ulei: 0,92—0,96; vopsea cu aluminiu: 0,27—0,67; apă 0,95—0,96.

Căldura transmisă între două suprafețe cenușii paralele avînd ariile A egale și temperaturile T_1 și T_2, se poate calcula cu relația:

$$Q=\varepsilon\sigma_n \cdot A\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]. \tag{116}$$

Cînd cele două suprafețe între care se schimbă căldură nu sînt egale sau au o poziție geometrică oarecare una față de alta, căldura transmisă prin radiație se calculează din relațiile:

$$\boxed{Q=\sigma_n \cdot A_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\mathcal{F}_{1,2}=\sigma_n \cdot A_2\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\mathcal{F}_{2,1}.} \tag{117}$$

Factorul $\mathcal{F}_{1,2}$ sau $\mathcal{F}_{2,1}$ ține seama de poziția relativă a celor două suprafețe A_1 și A_2 între care are loc schimbul de căldură și cuprinde și coeficienții de emisie ε_1 și ε_2 ai acestora:

$$\mathcal{F}_{1,2}=\frac{1}{\frac{1}{F_{1,2}}+\left(\frac{1}{\varepsilon_1}-1\right)+\frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)} \tag{163}$$

Dacă suprafața A_1 este înconjurată din toate părțile de suprafața A_2 (cazul corpurilor care se găsesc într-un cuptor) $\mathcal{F}_{1,2}=1$; dacă suprafața A_1 este mică în raport cu A_2 atunci se poate considera $\mathcal{F}_{1,2}=\varepsilon_1$.

Scanned with OKEN Scanner

Formulele de calcul stabilite mai sus sînt valabile pentru corpurile solide. Spre deosebire de corpurile solide, gazele absorb şi emit energie radiantă numai în anumite intervale (benzi) de lungime de undă caracteristice fiecărui gaz. Dintre gazele care intervin mai mult în tehnică, absorb şi emit radiaţi. calorice vaporii de apă, bioxidul de carbon, amoniacul, bioxidul de sulf, acidul clorhidric. Absorbţia radiaţiilor de către gaze are loc în timp ce radiaţia străbate gazul respectiv, deci depinde de grosimea stratului de gaz, precum şi de concentraţia (presiunea parţială) a gazului absorbant.

4) Izolarea termică

Pentru a micşora pierderile de căldură în mediul ambiant, utilajele în care au loc operaţii termice se izolează prin acoperirea suprafeţei lor cu un strat de izolaţie termică format din materiale cu conductivitate termică foarte mică. Stratul de izolaţie termică măreşte rezistenţa termică a peretelui, micşorînd astfel temperatura suprafeţei sale exterioare.

Ca materiale izolante se pot utiliza, sub diferite forme, funcţie de temperatură, următoarele: plută (expandată sau rumeguş), kieselgur, magnezie, vată de lemn, ciment poros, azbest, vată de sticlă, vată minerală, fibre textile polistiren expandat sau extrudat, poliuretani etc.

Materialele izolante se folosesc fie sub formă de paste, care se întăresc prin uscare, fie sub formă de material ca atare fixat pe suprafaţa de izolat.

Pentru reducerea pierderilor prin radiaţie se recurge la vopsirea suprafeţelor respective cu vopsele, avînd coeficienţi de emisie mici, sau chiar la argintarea acestora.

b. Încălzirea şi răcirea aparatelor din industria chimică

Introducerea căldurii (încălzirea) sau evacuarea acesteia (răcirea) într-un utilaj oarecare presupune schimbul de căldură între substanţele care se găsesc în utilajul respectiv şi un fluid exterior numit *agent purtător de căldură.*

Agenţii purtători de căldură sînt substanţe gazoase (vapori), lichide sau solide, care preiau energia termică din exterior de la o sursă oarecare şi o transportă la locul de folosire (agenţi de încălzire) sau evacuaează energia termică preluată de la substanţele care se răcesc (agenţi de răcire).

1) Metode de încălzire

Alegerea agentului purtător de căldură şi a modului de realizare a schimbului termic depinde de condiţiile în care se desfăşoară operaţiile care necesită introducerea sau evacuarea de căldură: temperatura (valoarea şi variaţia acesteia, diferenţa de temperatură necesară), suprafaţa de încălzire disponibilă, presiunea, solicitarea termică etc.

Încălzirea cu gaze. Gazele reprezintă purtători de căldură slabi, deoarece au căldură specifică mică şi coeficient parţial de transmitere a căldurii mic. Se utilizează mai ales gaze de ardere, obţinute prin arderea combustibililor,

Scanned with OKEN Scanner

care permit încălzirea de la 400°C pînă la 700°C şi chiar la 1 000°C. Încălzirea cu gaze de ardere se foloseşte în industria chimică la încălzirea cuptoarelor pentru topituri alcaline, obţinerea hidroxidului de sodiu solid etc.; de asemenea, se utilizează la încălzirea directă a materialului (cuptoarele cu vatră, cuptoarele rotative, uscătoarele etc.).

Pentru asigurarea unei concentrări mari de căldură pe suprafeţe sau volume mici, îmbunătăţind în acelaşi timp randamentul de folosire, se utilizează încălzirea prin ardere la suprafaţă sau arderea fără flacără. În acest caz, arderea are loc într-un strat granulos poros sau perete poros, desfăşurîndu-se cu viteză mare pe suprafaţa sau în porii materialului granular.

Dezavantajele încălzirii cu gaze sînt următoarele: încălzire neuniformă (temperatura scade), posibilitatea unor supraîncălziri locale, reglarea dificilă.

Încălzirea cu vapori. Datorită calităţilor lor superioare ca agenţi purtători de căldură, vaporii de apă, precum şi vaporii altor lichide cunosc o largă folosire în industria chimică şi petrolieră.

Vaporii de apă prezintă următoarele calităţi deosebite: coeficient de transfer termic foarte mare: căldură mare de condensare; posibilitatea de a fi transportaţi prin conducte la distanţe mari; încălzire uniformă deoarece condensarea are loc la temperatura constantă; reglarea uşoară a operaţiei de încălzire; cost redus; sînt neinflamabili şi netoxici.

Cel mai răspîndit mod de încălzire cu vapori de apă este încălzirea indirectă, prin intermediul unui perete despărţitor. Acest mod de încălzire se poate realiza prin serpentine interioare, prin manta, prin serpentine exterioare şi prin aparate tubulare special construite (schimbătoare de căldură); mai rar se utilizează şi încălzirea cu serpentine îngropate, de la turnare, în peretele recipientului care urmează să fie încălzit.

Încălzirea cu serpentine interioare permite utilizarea aburului la presiuni mari şi introducerea căldurii în locul dorit. Încălzirea prin manta (fig. 133, *a*) se realizează prin introducerea vaporilor în spaţiul format între manta şi peretele recipientului. Prezintă dezavantajul limitării ariei de încălzire la

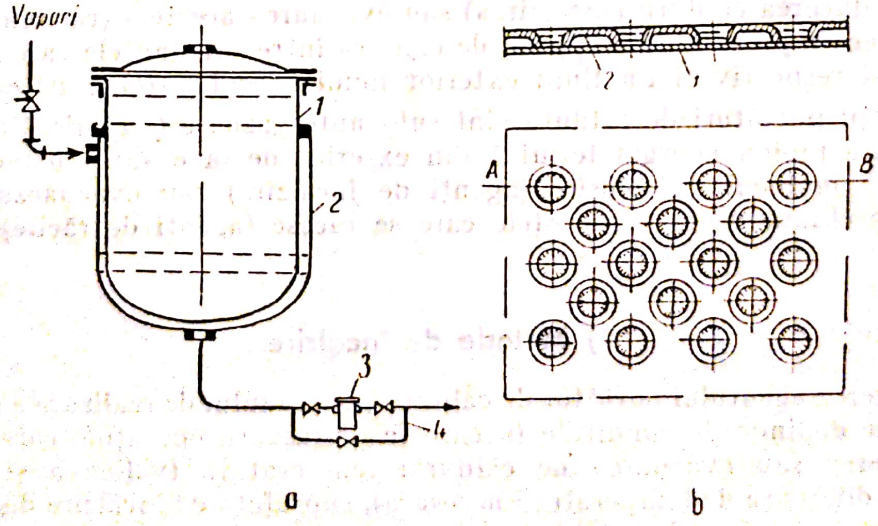


Fig. 133. Încălzirea cu vapori de apă prin manta:
a — la presiuni mici; *b* — cu puncte de întărire (pentru presiuni mari); *1* — corpul recipientului; *2* — manta; *3* — oală de condensat; *4* — conductă de ocolire.

aria peretelui recipientului; cînd aceasta este insuficientă (la recipientele mari) se poate combina cu încălzirea prin serpentine interioare. Grosimea pereților recipientului și ai mantalei este funcție de diametrul recipientului și de presiunea vaporilor. De aceea, la recipientele de dimensiuni obișnuite, presiunea vaporilor de încălzire nu depășește 16 at (200°C), deoarece grosimea pereților ar deveni prea mare. Pentru presiuni mai mari (pînă la 75 at, corespunzînd 290°C) se utilizează încălzirea prin manta cu puncte întărite prin sudură (fig. 133, *b*).

La încălzirea prin serpentine exterioare, acestea se sudează de peretele recipientului în care se găsește lichidul de încălzit. Se pot suda serpentine din conducte întregi, din jumătăți de conductă sau din fier cornier. Serpentina încălzitoare este fracționată în mai multe porțiuni, în scopul încălzirii mai elastice în diferite zone ale recipientului și al îndepărtării mai rapide a condensatului.

Încălzirea cu vapori de lichide greu volatile. Pentru încălzirea la temperaturi mai ridicate, în locul vaporilor de apă cu presiuni ridicate se utilizează *vaporii unor substanțe organice greu volatile sau vapori de mercur.* Dintre substanțele organice, răspîndirea cea mai mare ca purtători de căldură în industria chimică o au vaporii amestecului eutectic format din 26,5% difenil ($C_6H_5-C_6H_5$) și 73,5 difenil-eter ($C_6H_5-O-C_6H_5$). Acest amestec are temperatura de topire de 12,3°C și temperatura de fierbere de 255°C. Încălzirea cu vapori de difenil—difenil-eter se aplică la temperaturi cuprinse între 260 și 370°C; presiunea vaporilor la temperatura de 370°C este de 6,1 at. Coeficientul parțial de transfer termic la condensarea vaporilor de difenil—difenil-eter are valori cuprinse între 1 400 și 1 700 $J/m^2 \cdot s \cdot grd$.

La încălzirea cu vapori, o problemă deosebit de importantă o constituie evacuarea condensatului pe măsură ce se formează, pentru a nu îneca suprafața prin care are loc transmiterea căldurii. Pentru presiuni supraatmosferice (efective) mici (0,4—1 at) sau presiuni subatmosferice, condensatul se poate evacua printr-o conductă barometrică ascendentă (suprapresiune) sau descendentă (depresiune), prevăzute cu închideri hidraulice. Pentru presiuni mai mari se utilizează dispozitive de evacuare numite oale de condensat.

Încălzirea cu purtători de căldură în stare lichidă. În industria chimică lichidele se utilizează fie sub formă de băi, ca intermediar între aparatul care trebuie încălzit și gazele de ardere, fie ca purtători de căldură în circuit închis între aparat și sursa de căldură; ultima formă este cea mai răspîndită.

Circulația purtătorului de căldură lichid între sursa de căldură (generator de căldură sau alt mod de încălzire) și aparatul pe care urmează să-l încălzească se poate realiza fie datorită diferenței de densitate între lichidul fierbinte și cel care iese din aparat (circulație naturală, termosifon), fie cu ajutorul unei pompe de recirculație, așa cum se indică în figura 134. Pentru a se realiza circulația naturală, între generatorul de căldură și aparatul care urmează să fie încălzit se prevede o diferență de nivel de 1,5—2 m.

Circulația forțată a lichidelor (cu ajutorul pompelor) se realizează cu viteze mari, ceea ce duce la mărirea coeficienților parțiali de transfer termic.

Dintre lichide, apa se utilizează ca purtător de căldură pînă la punctul critic (374°C și 225 at); în acest caz, încălzirea apei se realizează în generatoare de căldură speciale, în care preia căldura gazelor de ardere. Este indicat să se folosească ca agent de încălzire apa sub formă de condensat, provenită de la evaporatoare sau de la alte aparate. Utilizarea condensatului ca purtător

Scanned with OKEN Scanner

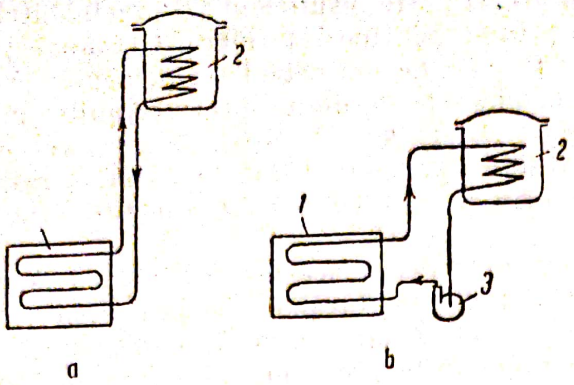


Fig. 134. Schema circulației purtătorilor de căldură lichizi:
a — circulație naturală;
b — circulație forțată;
1 — generator de căldură;
2 — aparat de încălzire;
3 — pompă.

de căldură se recomandă atunci cînd acesta, dintr-o pricină oarecare nu se mai poate reintroduce în cazan.

Pentru temperaturi pînă la 300°C se pot utiliza ca purtători de căldură uleiurile minerale; temperatura maximă este limitată de descompunerea termică a uleiului.

La încălzirea utilajelor la temperaturi mai mari se utilizează și unele lichide organice cu punct ridicat de fierbere, cum sînt: difenilul, difenil-eterul, amestecul eutectic difenil—difenil-eter, glicerina, naftalina, tetraclor-difenilul și unii siliconi. Cea mai mare utilizare în industria chimică și petrochimică o are amestecul difenil—difenil-eter, cu ajutorul căruia se pot realiza temperaturi pînă la 250°C fără presiune și pînă la 360—380°C sub presiune.

Pentru încălzirea la temperaturi între 400 și 550°C se folosesc băi de săruri topite și chiar metale topite. Se utilizează amestecurile eutectice binare și ternare de azotiți și azotați.

Încălzirea cu purtători de căldură solizi. Ca și purtătorii de căldură lichizi, agenții termici solizi se pot utiliza atît sub formă de băi, cît și în circuit închis, prin recircularea unor bile sau materiale granulare pulverulente. În procedeul de încălzire numit termofor, bilele sînt încălzite direct într-un generator de căldură, prin arderea unui gaz combustibil, de unde trec, prin cădere liberă, în aparatul de încălzit (de obicei un reactor chimic), unde încălzesc reactanții respectivi; după ce au cedat căldura în reactor, bilele sînt readuse, printr-un mijloc oarecare de transport, din nou în generatorul de căldură; dacă bilele sînt utilizate în reactor pentru cracarea produselor petroliere, căldura necesară încălzirii acestora se obține prin arderea carbonului depus pe suprafața bilelor în generatorul de căldură.

Încălzirea cu materiale granulare pulverulente, ca purtători de căldură solizi, se poate realiza prin fluidizare.

2) Metode de răcire

Pentru răcirea la temperaturi obișnuite se utilizează *aerul* și *apa*, iar pentru răcirea la temperaturi mai joase (5—20°C sub zero) se utilizează *soluțiile unor săruri minerale* sau *lichide organice*.

Răcirea cu aer se realizează de obicei în convecție forțată, cu ajutorul unor ventilatoare puternice care suflă aerul peste schimbătoare de căldură special construite (schimbătoare de căldură cu aripioare), în vederea măririi atît a suprafeței de contact, cît și a coeficientului de transfer termic.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru răcirea apei se foloseşte circulaţia naturală a aerului în turnuri speciale, numite *turnuri de răcire*; în acest caz, efectul de răcire este amplificat datorită evaporării unei părţi din apa care se răceşte.

Apa reprezintă, de asemenea, unul din cei mai răspîndiţi agenţi de răcire, datorită atît capacităţii sale calorice mari şi a coeficientului parţial de transfer termic ridicat, cît şi faptului că este disponibilă, la un preţ de cost redus. Totuşi, în ultimul timp, necesităţile de apă au crescut foarte mult, încît se recurge din ce în ce mai des la răcirea cu aer.

Apa de răcire poate proveni din puţuri şi atunci temperatura sa este de circa 15°C sau poate reprezenta apa de recirculaţie, răcită în turnurile de răcire, cînd temperatura sa trebuie considerată între 25 şi 30°C. La răcirea cu apă, temperatura finală a acesteia nu trebuie să depăşească 50—60°C, deoarece peste această temperatură au loc depuneri de săruri (cruste) pe suprafaţa prin care are loc transferul termic.

3) Schimbătoare de căldură

Prin schimbătoare de căldură se înţeleg aparatele termice folosite în industria chimică pentru transferul de căldură între două fluide.

După modul de funcţionare, schimbătoarele de căldură se clasifică în două mari grupe:

a) *recuperatoare sau schimbătoare de căldură propriu-zise*, care au funcţionare continuă în regim staţionar;

b) *regeneratoare*, în care schimbul de căldură de la fluidul cald la cel rece se face prin intermediul unei umpluturi solide, trecînd succesiv în regim nestaţionar, prin faza de încălzire şi răcire.

În funcţie de scopul urmărit, schimbătoarele de căldură propriu-zise pot avea, de asemenea, denumiri diferite, ca: *preîncălzitor*, *răcitor*, *condensator evaporator* etc. În cele ce urmează se vor prezenta tipurile mai importante de schimbătoare de căldură propriu-zise, adoptîndu-se clasificarea după criteriul constructiv.

Schimbătoarele de căldură cu ţevi coaxiale. Sînt constituite (fig. 135) din mai multe elemente, formate din două ţevi coaxiale asamblate prin intermediul unor coturi, pentru legarea conductelor interioare, şi prin punţi din racorduri cu flanşe, pentru legarea ţevilor exterioare suprapuse; se mai numesc şi schimbătoare de căldură „ţeavă în ţeavă". Ţevile exterioare sînt îmbinate cu cele interioare prin sudură şi uneori prin înşurubare. Datorită secţiunilor mici ale celor două ţevi se realizează viteze mari de circulaţie a fluidelor, ceea ce asigură coeficienţi de transfer termic cu valori mari.

Schimbătoare de căldură tubulare. Sînt cele mai răspîndite schimbătoare de căldură din industria chimică. Aceste schimbătoare de căldură, în forma lor cea mai simplă (fig. 136, *a*) constau dintr-un fascicul de ţevi *3* ale căror capete sînt fixate prin madrinare, lipire, sudare sau presetupă, în găurile a două plăci speciale, numite plăci tubulare *2*; fasciculul de ţevi este introdus într-o manta *1*, fixată etanş de plăcile tubulare, prevăzută cu două capace *4* şi *5* care delimitează camerele necesare distribuţiei şi colectării fluidului care circulă prin ţevi; pentru intrarea şi ieşirea fluidelor sînt prevăzute patru ştuţuri, două la manta şi cîte unul la fiecare capac. În această construcţie,

Scanned with OKEN Scanner

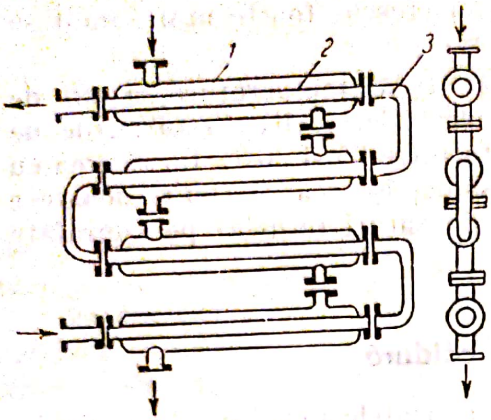


Fig. 135. Schimbător de căldură cu țevi coaxiale:

1 — țeavă exterioară; *2* — țeavă interioară; *3* — coturi.

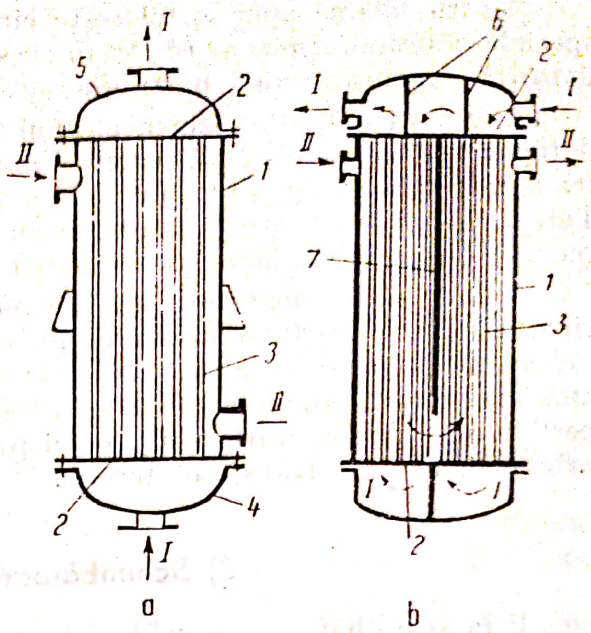


Fig. 136. Schimbătoare de căldură tubulare:

a — schimbător, simplu cu o singură trecere prin țevi; *b* — cu mai multe treceri prin țevi; *1* — manta; *2* — placă tubulară; *3* — țevi; *4, 5* — capace; *6* — pereți despărțitori; *7* — șicană longitudinală.

unul dintre fluide *I* circulă prin țevi (intratubular), fiind distribuit și colectat de camerele formate între capace și plăcile tubulare, iar celălalt *II* circulă prin spațiul dintre țevi (intertubular).

Această construcție realizează atît o fracționare a curentului, avînd ca rezultat creșterea vitezei de circulație și deci a coeficientului parțial de transfer termic, cît și mărirea ariei de schimb termic, care ajunge pînă la 40 m^2 pe metru cub de aparat.

Perfecționările și îmbunătățirile constructive aduse schimbătoarelor de căldură au urmărit următoarele scopuri principale: a) intensificarea schimbului de căldură prin mărirea vitezei de circulație a fluidelor; b) evitarea eforturilor de dilatare neegală a țevilor și a mantalei și c) ușurarea curățirii de crustă și depuneri a suprafeței de încălzire.

Pentru intensificarea transferului de căldură în partea fluidului care circulă prin țevi, se mărește viteza acestuia (se știe că $\alpha \approx \omega^{0,8}$) prin parcurgerea schimbătorului de căldură nu dintr-o singură dată, ci din mai multe treceri, trecînd într-un sens și în sens contrar prin cîte o parte din țevile fasciculului. Dirijarea lichidului într-un sens sau altul se face cu ajutorul unor pereți despărțitori montați etanș între capace și plăcile tubulare; în figura 136, *b* este reprezentat un schimbător de căldură tubular ca patru treceri prin țevi.

Intensificarea transferului de căldură de partea fluidului care circulă printre țevi se realizează mărind viteza și turbulența curentului respectiv, prin montarea în spațiul dintre țevi a unor șicane longitudinale (paralele cu țevile, ca în figura 136, *b*) sau transversale (perpendicular pe țevi).

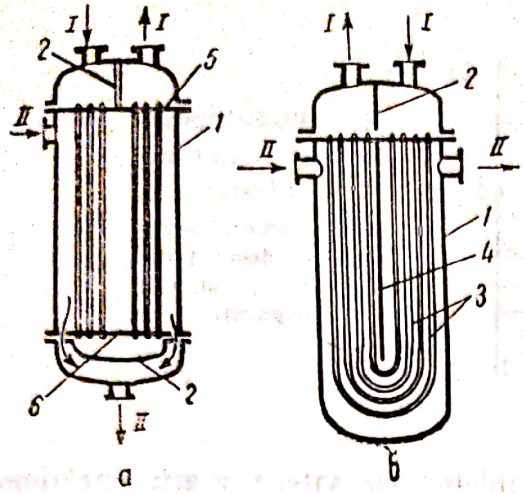


Fig. 137. Construcţii de schimbătoare de căldură pentru compensarea sau înlăturarea eforturilor de dilatare:
a — cu cap flotant închis; *b* — cu ţevi în formă de U; *1* — manta; *2* — cap flotant; *3* — ţevi în formă de U; *4* — şicană longitudinală; *5* — placă tubulară; *6* — placă tubulară a capului flotant.

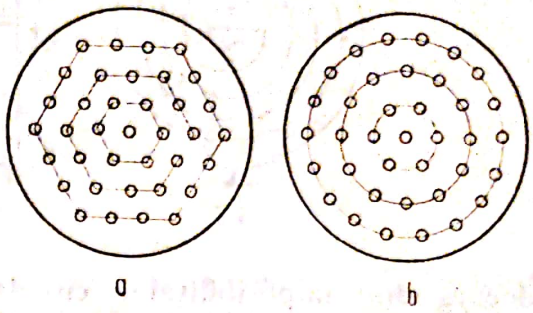


Fig. 138. Dispunerea ţevilor în schimbătoarele de căldură tubulare:
a — în hexagon; *b* — în cercuri concentrice.

Folosirea şicanelor transversale este recomandată pentru cazul cînd printre ţevi circulă gaze care, după cum se ştie, au coeficienţi parţiali de transfer termic cu valori mici.

Pentru înlăturarea solicitărilor datorită dilatărilor inegale ale ţevilor şi mantalei, se folosesc schimbătoare de căldură prevăzute cu lentile de dilatare în manta sau schimbătoarele de căldură cu cap flotant. La schimbătoarele de căldură cu cap flotant, numai una dintre plăcile tubulare este fixată în manta, cealaltă putîndu-se deplasa liber în direcţia de dilatare a ţevilor. Aceste schimbătoare au poziţie verticală; se construiesc cu cap flotant închis, avînd capătul inferior flotant (fig. 137, *a*). La aceste schimbătoare de căldură, fasciculul de ţevi se poate demonta şi scoate din manta pentru reparaţii sau curăţirea suprafeţei de transfer termic. Tot pentru înlăturarea eforturilor produse de dilatarea neegală a ţevilor şi a mantalei se construiesc schimbătoare de căldură cu ţevi în formă de U (fig. 137, *b*). Aceste schimbătoare de căldură au numai o singură placă tubulară, lichidul I parcurgînd schimbătorul de două ori; fascicolul de ţevi se poate demonta şi scoate din manta, însă curăţirea interioară a ţevilor este foarte dificilă.

În schimbătoarele de căldură tubulare, ţevile sînt repartizate cît mai uniform pe întreaga secţiune transversală. În plăcile tubulare, ţevile sînt dispuse în cercuri concentrice, în pătrat sau în hexagon (fig. 138).

În ceea ce priveşte circulaţia fluidelor în schimbătoarele de căldură tubulare, de regulă prin ţevi circulă fluidul mai cald, cu debit mai mic, cu presiune mai mare, cel care formează crusta; printre ţevi circulă fluidele cu debit mai mare, cu viscozitate mai mică, gazele, vaporii.

Schimbătoarele de căldură tubulare prezintă următoarele avantaje principale: capacitate mare, realizînd concentrări de suprafaţă de 40 m^2/m^3; *coeficienţii de transfer termic acceptabili; consum redus de metal; curăţirea uşoară a spaţiului intratubular (cu excepţia ţevilor în formă de U).* Dezavantajele acestor construcţii

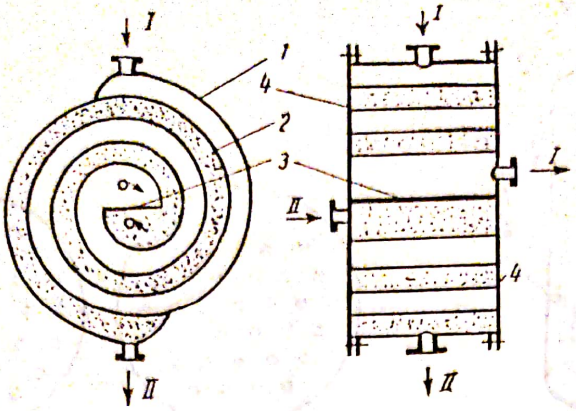


Fig. 139. Schimbător de căldură spiral:
1, 2 — table; 3 — perete despărțitor; 4 — pereți laterali (capace).

decurg din: imposibilitatea circulației fluidelor cu viteze mari; curățirea dificilă a spațiului intertubular; dificultatea construirii lor din materiale care nu suportă mandrinarea și sudura (fonta, ferosiliciul etc.).

Schimbătoare de căldură spirale. La schimbătoarele de căldură din această categorie (fig. 139), spațiile prin care circulă cele două fluide reprezintă două canale în spirală, de formă dreptunghiulară. Canalele sînt delimitate în lungul lor de două table subțiri îndoite în formă de spirală, iar lateral, de doi pereți plani (capace plane); tablele care formează și delimitează cele două spații spirale au și rolul de suprafață de schimb termic. Capetele interioare ale celor două table sînt unite cu un perete despărțitor care asigură delimitarea inițială a celor două spații. Pentru fiecare din cele două spații sînt prevăzute cîte un racord central și unul periferic pentru intrarea și ieșirea fluidelor; cele două fluide pot circula în curent paralel sau în contracurent.

Avantajele schimbătoarelor de căldură spirale sînt următoarele;

— posibilitatea circulației ambelor fluide cu viteze mari;

— coeficienți parțiali de transfer termic de cîteva ori mai mari decît la schimbătoarele tubulare; valoarea coeficientului total ajunge la 3 500 $J/m^2 \cdot s \cdot grd$;

— compactitate mare; această construcție realizează o mai mare concentrare a suprafeței de transmitere, ajungînd pînă la 60 m^2/m^3.

Datorită acestor avantaje, schimbătoare de căldură spirale cunosc o răspîndire din ce în ce mai mare în industria chimică și petrochimică, putînd fi utilizate la recuperarea căldurii la diferențe de temperatură de numai cîteva grade.

Dezavantajele acestor schimbătoarele de căldură se datoresc dificultăților de etanșare laterală, complexității construcției, precum și limitării folosirii la presiuni mici care nu depășesc 6 at sau, în cazuri deosebite, 10 at.

Schimbătoare de căldură cu plăci. La aceste schimbătoare de căldură, spațiile prin care circulă fluidele sînt delimitate de către plăci subțiri, plane sau profilate, dispuse astfel încît să asigure o concentrare cît mai mare a suprafeței de încălzire și o circulație a fluidelor care să favorizeze schimbul de căldură la diferențe mici de temperatură.

În ultimul timp s-au realizat schimbătoare de căldură din plăci plane verticale, strînse cu ajutorul unei prese hidraulice, etanșarea asigurîndu-se prin garnituri speciale din cauciuc. Așa cum se observă în figura 140, fiecare placă are cîte patru orificii, care prin asambalarea plăcilor constituie canalele pentru circulația fluidelor; dispunerea garniturilor asigură repartizarea și

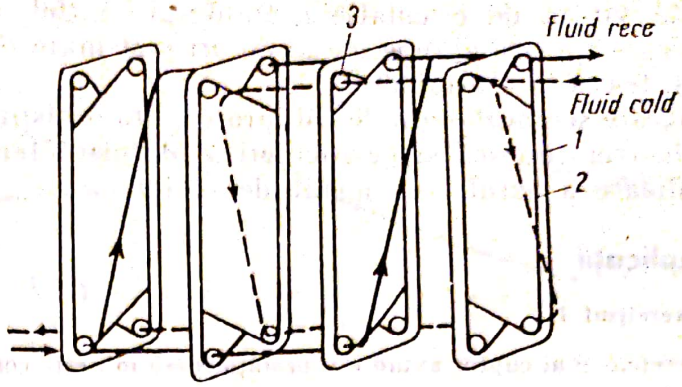


Fig. 140. Schimbătoare de căldură cu plăci:
1 — placă; 2 — garnitură; 3 — orificiu.

circulația fluidelor prin spațiile delimitate de două plăci consecutive. În acest mod se poate realiza circulația în contracurent a fluidelor pentru fiecare placă în parte, putîndu-se lucra la diferențe finale de temperatură foarte mici.

Schimbătoare de căldură cu aripioare. Construcția acestor schimbătoare de căldură a rezultat din necesitatea de a mări suprafața de transfer de partea fluidului cu rezistență termică mare. Într-adevăr, cînd coeficientul parțial de transfer de căldură al unuia dintre fluide este foarte mic (cazul gazelor) față de cel corespunzător celuilalt fluid (abur care condensează), transmiterea căldurii se îmbunătățește mult prin mărirea suprafeței de transfer de partea fluidului cu coeficient de transfer termic mic. Această mărire a suprafeței se realizează în schimbătoarele de căldură cu aripioare longitudinale sau transversale fixate pe țevi, de la turnare sau prin sudură. În figura 141 se prezintă schița unui schimbător de căldură realizat prin unirea mai multor elemente constituite din țevi cu aripioare transversale. Gazele circulă întotdeauna în exteriorul țevilor, perpendicular pe acestea. La schimbătoarele de căldură cu aripioare longitudinale, gazele circulă în lungul elementelor. Efectul de mărire a suprafeței cu ajutorul aripioarelor este cu atît mai mare cu cît este mai

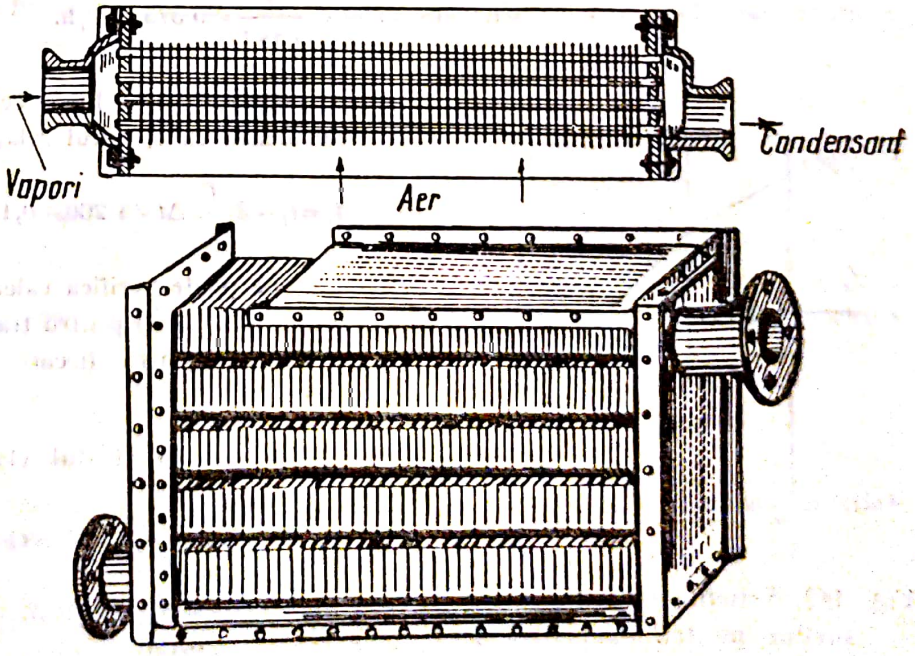


Fig. 141. Schimbătoare de căldură cu aripioare.

Scanned with OKEN Scanner

ridicată viteza de circulație a fluidului. Astfel, căldura transmisă printr-o țeavă cu aripioare ajunge de 20 de ori mai mare decît căldura transmisă prin aceeași țeavă fără aripioare.

Aceste schimbătoare de căldură capătă o răspîndire din ce în ce mai mare în industria chimică și petrochimică, datorită tendinței tot mai pronunțate de utilizare a aerului ca agent de răcire.

Aplicații

Exercițiul 1

Peretele unui cuptor avînd o suprafață $A=5$ m², este construit din două straturi de cărămidă: stratul interior cu grosimea $\delta_1=120$ mm, din cărămidă refractară, și stratul exterior, cu grosimea $\delta_2=200$ mm, din cărămidă de construcție. Conductivitățile termice ale celor două straturi au valorile: $\lambda_1=0{,}45$ J/m · s · grd și $\lambda_2=0{,}35$ J/m · s · grd. Se cere să se determine căldura pierdută prin peretele respectiv, precum și temperatura dintre cele două straturi, cunoscînd că temperatura pe fața interioară a peretelui este $t_i=1\,200$°C iar pe fața exterioară $t_e=150$°C (fig. 142).

Rezolvare

Căldura pierdută reprezintă căldura transmisă prin conducție prin peretele cuptorului din interior către exterior. Pentru calculul căldurii respective se utilizează ecuația generală de transmitere a căldurii:

$$Q=K\cdot A\,\Delta t=K\cdot A(t_i-t_e).$$

Coeficientul total de transmitere a căldurii se determină conform relației (103):

$$K=\frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}}=\frac{1}{\frac{0{,}120}{0{,}45}+\frac{0.2}{0{,}35}}=1{,}19\ \text{J/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{grd}.$$

Înlocuind în ecuația generală, rezultă:

$$Q=1{,}19\times 5\times(1\,200-150)=6\,250\ \text{J/s},$$

sau, pentru a exprima căldura pierdută în kilocalorii pe oră:

$$Q=6\,250\times 3\,600\times\frac{1}{4\,187}=5\,375\ \text{kcal/h}.$$

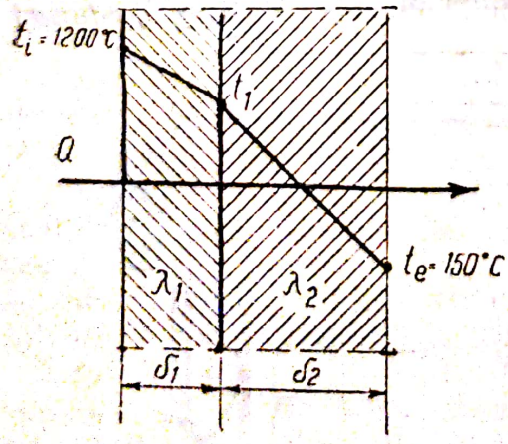


Fig. 142. Schema variației temperaturilor pentru exercițiul 1.

Temperatura între cele două straturi t_1 se calculează cu ajutorul relației (105):

$$t_1=t_i-\delta_1\frac{K}{\lambda_1}\Delta t=1\,200-0{,}120\frac{1{,}19}{0{,}45}\times 1\,050=866\text{°C}.$$

Se poate verifica calculul temperaturii, aplicînd relația (104) pentru transmiterea căldurii prin conducție, pentru fiecare strat al peretelui în parte:

— pentru stratul (1): $Q=\frac{\lambda_1}{\delta_1}A\cdot\Delta t_1=$

$$=\frac{0{,}45}{0{,}120}\times 5\times(1\,200-866)=$$

$$=\frac{0{,}45}{0{,}120}\times 5\times 334\approx 6\,250\ \text{J/s}.$$

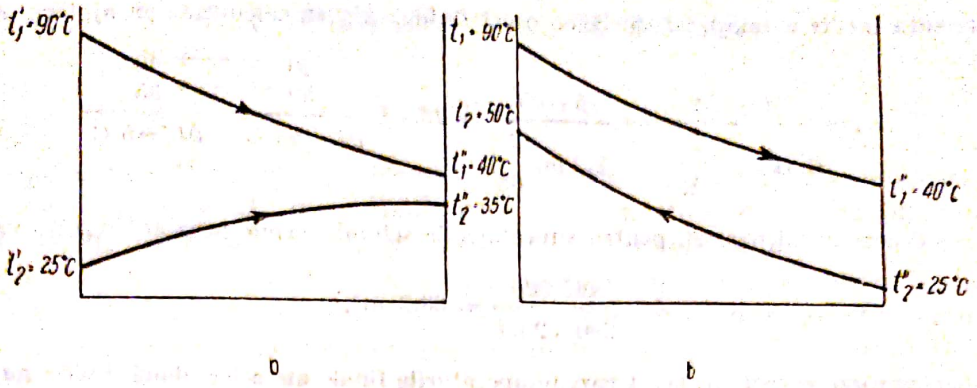


Fig. 143. Schiță ajutătoare la exercițiul 2.

— pentru stratul (2): $Q=\frac{\lambda_2}{\delta_2} A \cdot \Delta t_2=\frac{0{,}35}{0{,}200}\times 5\times(866-150)=\frac{0{,}35}{0{,}200}\times 5\times 716=6\,250$ J/s.

Obținîndu-se aproximativ aceeași valoare a căldurii transmise prin fiecare strat în parte, rezultă că temperatura t_1 a fost calculată corect.

Exercițiul 2

Într-un răcitor tubular se răcește o soluție, avînd un debit $Q_m=10\,000$ kg/h, de la temperatura inițială $t_1=90$°C la temperatura finală $t_1=40$°C, cu apă a cărei temperatură inițială este $t_2=25$°C. Se cere să se determine suprafața necesară pentru a realiza transferul de căldură cerut și debitul apei de răcire pentru circulația în curent paralel și în contracurent a celor două fluide. Se dau: căldura specifică a soluției $c_1=3\,350$ J/kg · grd; căldura specifică a apei $c_2=4\,190$ J/kg · grd; coeficientul total de transmitere a căldurii, $K=290$ J/m² · s · grd.

Rezolvare

Variația temperaturii celor două fluide în lungul schimbătorului de căldură s-a reprezentat, în figura 140 atît pentru curent paralel (fig. 143, *a*) cît și pentru contracurent (fig. 143, *b*).

a) *Calculul debitului apei de răcire și suprafeței necesare pentru circulația în curent paralel.* Deoarece în cazul curentului paralel temperatura finală a fluidului rece este întotdeauna mai mică decît temperatura finală a fluidului cald, se propune pentru apa de răcire temperatura finală $t_2''=35$°C. Debitul apei de răcire $Q_{m,r}$ se calculează din bilanțul caloric:

$$c_1 \cdot Q_m(t_1'-t_1'')=c_2 \cdot Q_{m,r}(t_2''-t_2'),$$

din care rezultă:

$$Q_{m,r}=\frac{c_1 \cdot Q_m(t_1'-t_1'')}{c_2(t_2''-t_2')}=\frac{3\,350 \cdot 10\,000 \cdot (90-40)}{4\,190(35-25)}=40\,000 \text{ kg/h}.$$

Suprafața necesară realizării transferului termic se calculează din relația (115) scrisă sub forma:

$$A=\frac{Q}{K \cdot \Delta t_m}.$$

Căldura Q care se transmite în unitatea de timp se calculează din ecuația calorimetrică corespunzătoare răcirii fluidului cald:

$$Q=c_1 \cdot Q_m(t_1'-t_1'')=3\,350\,\frac{10\,000}{3\,600}\,(90-40)\approx 465\,000 \text{ J/s}$$

Diferența medie a temperaturii celor două fluide, Δt_m se calculează cu ajutorul ecuației

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{2{,}31 \log \frac{\Delta t''}{\Delta t'}} = \frac{5-65}{2{,}3 \log \frac{5}{65}} = 23{,}4°C \quad \begin{matrix} 90 \longrightarrow 40 \\ 50 \longrightarrow 35 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \Delta t' = 65°C & \Delta t'' = 5°C \end{matrix}$$

În cazul curentului paralel, pentru suprafața de schimb termic necesară rezultă valoarea:

$$A = \frac{465\,000}{290 \times 23{,}4} = 68{,}3 \text{ m}^2.$$

b) *Pentru contracurent.* În acest caz, temperaturile finale ale celor două fluide nu se mai limitează reciproc. Pentru apa de răcire se poate lua o temperatură superioară celei de ieșire a fluidului cald; pentru apa de răcire se consideră temperatura finală $t_2 = 50°C$. Pentru debitul apei de răcire va rezulta valoarea:

$$Q_m = \frac{3\,350 \cdot 10\,000 \cdot (90-40)}{4\,190(50-25)} = 16\,000 \text{ kg/h}.$$

Diferența medie de temperatură Δt va reprezenta, în acest caz:

$$\Delta t_{m,r} = \frac{15-40}{2{,}3 \log \frac{15}{40}} = 25{,}6°C. \quad \begin{matrix} 50 \longrightarrow 40 \\ 90 \longrightarrow 35 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \Delta t' = 40°C & \Delta t'' = 15°C \end{matrix}$$

iar suprafața A de transfer termic:

$$A = \frac{465\,000}{290 \times 25{,}6} = 62{,}5 \text{ m}^2$$

Rezultă că, în cazul circulației în contracurent, se reduce atît debitul apei de răcire cît și suprafața necesară pentru realizarea transferului termic.

Verificarea cunoștințelor

1. Care sînt modurile prin care are loc transmiterea căldurii?
2. Explicați transmiterea căldurii prin convecție.
3. Ce reprezintă diferența medie de temperatură?
4. Care sînt factorii de care depinde valoarea coeficienților parțiali de transmitere a căldurii prin convecție? Dați cîteva valori orientative ale acestui coeficient.
5. Care sînt factorii de care depinde transmiterea căldurii prin radiație?
6. Ce se înțelege prin purtători de căldură?
7. Faceți o comparație între încălzirea cu gaze și încălzirea cu lichide.
8. Cum se evacuează condensatul la încălzirea cu vapori?
9. Cum se clasifică schimbătoarele de căldură?
10. Care sînt elementele constitutive ale unui schimbător de căldură tubular?
11. Care sînt modalitățile de intensificare a transferului de căldură în schimbătoarele tubulare?
12. Descrieți constructiv și funcțional schimbătorul de căldură spiral.
13. Justificați utilizarea schimbătoarelor de căldură cu aripioare.

Scanned with OKEN Scanner

2. EVAPORAREA ŞI CONDENSAREA

a. Evaporarea

Evaporarea este o operaţie termică de separare parţială (concentrarea) *sau totală a soluţiilor* formate prin dizolvarea substanţelor nevolatile în dizolvanţi volatili. *Operaţia constă în transformarea în vapori a dizolvantului volatil, urmată de îndepărtarea acestora din aparatul în care are loc operaţia*; în acest mod, conţinutul dizolvantului în soluţie scade, iar concentraţia soluţiei în substanţă nevolatilă (dizolvat) creşte. Transformarea dizolvantului în vapori se poate face prin fierbere sau prin vaporizare; evaporarea se referă numai la transformarea dizolvantului în vapori prin fierbere.

Prin evaporare, vaporii dizolvantului se obţin în stare practic pură, iar substanţa nevolatilă (dizolvatul) — de obicei un solid sau un lichid cu temperatură ridicată de fierbere (acid sulfuric, glicerină etc.) — rămîne în stare concentrată în aparat sau se separă în stare solidă prin operaţii auxiliare (cristalizarea). Utilajele în care se realizează operaţia de evaporare se numesc **evaporatoare.**

Căldura necesară evaporării poate fi furnizată de purtători de căldură gazoşi, lichizi sau vapori, prin încălzire directă sau indirectă. Cel mai răspîndit mod de transmitere a căldurii în evaporatoare este încălzirea indirectă cu vapori de apă.

Vaporii de apă utilizaţi pentru încălzirea evaporatoarelor se numesc vapori primari (abur primar), iar vaporii rezultaţi în urma evaporării dizolvantului se numesc vapori secundari (abur secundar); noţiunea de abur se utilizează numai pentru vaporii de apă.

În industria chimică şi petrochimică, operaţia de evaporare se realizează prin trei procedee importante:

a) *evaporarea cu simplu efect* (simplă), care se realizează într-un singur evaporator; vaporii secundari rezultaţi sînt evacuaţi în atmosferă, condensaţi sau li se dă o utilizare în afara operaţiei de evaporare;

b) *evaporarea cu efect multiplu*, care se realizează în mai multe evaporatoare legate în serie, lucrînd sub presiune descrescătoare de la primul la ultimul, astfel încît, exceptînd primul evaporator, vaporii secundari formaţi într-un evaporator servesc pentru încălzirea evaporatorului următor;

c) *evaporarea cu pompă de căldură*, care utilizează (în calitate de vapori primari) vaporii secundari rezultaţi în acelaşi evaporator, după ce li se ridică presiunea şi temperatura de condensare prin comprimare.

Alegerea procedeului de evaporare cel mai potrivit, a tipului de evaporator cel mai eficient, conducerea şi exploatarea instalaţiei de evaporare necesită cunoaşterea tuturor factorilor care influenţează operaţia de evaporare.

Factorii care influenţează operaţia de evaporare. Aceşti factori se referă atît la soluţia iniţială cît şi la soluţia concentrată, precum şi la operaţia de evaporare în ansamblu. Influenţa lor se poate manifesta asupra transferului termic, asupra calităţii soluţiei finale, asupra eficienţei instalaţiei sau asupra costului operaţiei de evaporare.

Dintre factorii referitori la soluţia iniţială, o importanţă deosebită o prezintă: *concentraţia şi natura soluţiei, constantele fizice ale soluţiei* (η, ρ, λ, c, r) *şi variaţia lor cu concentraţia, temperatura de fierbere a soluţiei, presiunea de vapori, sensibilitatea termică, depunerea de cruste sau cristale, formarea de spumă.*

Scanned with OKEN Scanner

Factorii referitori la soluția concentrată cuprind, în afara celor enumerați la soluția inițială, *concentrația soluției finale* și *forma acesteia* (soluție, topitură sau cristale).

Dintre factorii referitori la operația de evaporare în ansamblu, o importanță deosebită o prezintă: *modul de funcționare* (continuu sau discontinuu), *circulația soluției în evaporator și în instalație, presiunea și temperatura în evaporatoare, presiunea hidrostatică, parametrii aburului primar, durata evaporării, costul operației.*

1. *Temperatura de fierbere a soluției.* Temperatura de fierbere a soluției într-un evaporator t' este mai mare decît temperatura de fierbere a solventului pur t la presiunea sub care are loc evaporarea. Creșterea temperaturii de fierbere a soluției se datorește influenței substanței nevolatile dizolvate, presiunii hidrostatice din evaporator și rezistențelor hidraulice la trecerea vaporilor secundari.

2. *Sensibilitatea termică.* Unele substanțe, în special organice, prin menținerea la o temperatură mai ridicată se degradează, adică se descompun chimic sau pierd anumite calități privind aspectul, mirosul sau culoarea. Degradarea este funcție de produsul $(t \cdot \tau)$ dintre temperatura t și durata de rămînere τ la temperatura respectivă. Rezultă deci că pentru substanțele termolabile este necesar ca evaporarea să se efectueze la temperaturi cît mai joase, în timp cît mai scurt.

3. *Concentrația soluției.* Creșterea concentrației soluțiilor în evaporatoare influențează defavorabil operația de evaporare, prin înrăutățirea transmiterii de căldură, prin reducerea circulației soluției în interiorul spațiului de evaporare și prin depunerea de cruste.

1) Evaporarea simplă

Acest procedeu realizează concentrarea soluției într-un singur evaporator, prin evaporarea soluției pînă la atingerea concentrației cerute; *evaporarea simplă poate fi continuă sau discontinuă.* În figura 144 este reprezentată schematic concentrarea unei soluții, prin evaporare simplă, într-un singur aparat cu funcționare continuă. Soluția inițială S_0 este continuu alimentată în evaporator; în urma evaporării rezultă vaporii secundari W_1 și soluția concentrată (produsul) P_1 care, de asemenea, se evacuează continuu din evaporator. Evaporatorul este încălzit cu aburul primar V_0, printr-un sistem tubular de încălzire; aburul primar cedează în evaporator numai căldura de vaporizare și este evacuat continuu sub forma condensatului V_0. Vaporii secundari W_1 sînt fie evacuați în atmosferă, fie condensați într-un condensator, fie utilizați ca purtător de căldură pentru încălzirea altor aparate.

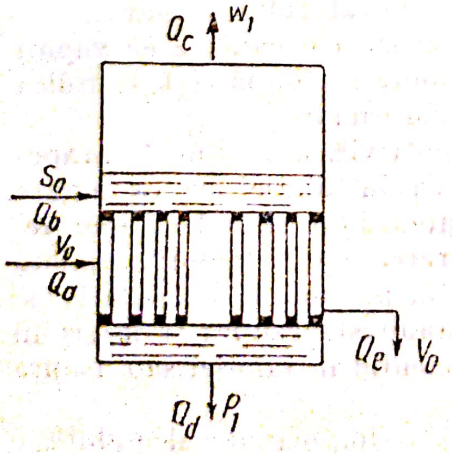


Fig. 144. Schiță de principiu pentru evaporarea simplă.

Calculul operației de evaporare simplă. Pentru calculul unui evaporator este necesar să se cunoască materialele intrate și ieșite, căldura necesară pentru concentrarea soluției și suprafața necesară realizării transferului de

Scanned with OKEN Scanner

căldură de la aburul primar al soluției de concentrat. Mijloacele principale pentru efectuarea acestui calcul sînt *bilanțul de materiale, bilanțul termic* și *transmiterea căldurii însoțită de schimbarea stării fizice a fluidului.*

1. *Bilanțul de materiale al unui evaporator.* Se va stabili bilanțul de materiale pentru evaporatorul schițat în figura 144. Bilanțul total al evaporatorului (conform notațiilor de pe figură) este redat de ecuația:

$$S_0 = W_1 + P_1. \tag{118}$$

Dacă se notează cu C_i concentrația inițială a soluției S_0 și cu C_f, concentrația finală a soluției care iese din evaporator, bilanțul parțial pentru substanța nevolatilă dizolvată (concentrația sa în vaporii secundari este nulă) se reprezintă prin ecuația:

$$S_0 C_i = P_1 \cdot C_f. \tag{119}$$

De obicei sînt date debitul sau cantitatea soluției inițiale S_0 și concentrația inițială C_i și finală C_f ale soluției. În acest caz, debitul sau cantitatea soluției concentrate P_1 și a vaporilor secundari W_1 se calculează cu relațiile:

$$P_1 = S_0 \frac{C_i}{C_f} \tag{120}$$

$$W_1 = S_0 - P_1 = S_0\left(1 - \frac{C_i}{C_f}\right) \tag{121}$$

2. *Bilanțul termic al unui evaporator.* Pentru evaporatorul schițat în figura 144, considerat că funcționează în regim staționar, căldurile care intră sînt cele aduse cu aburul primar Q_a și cu soluția inițială Q_b; din evaporator, dacă se neglijează pierderile de căldură în exterior, ies căldurile Q_c cu vaporii secundari, Q_d cu soluția concentrată și Q_e cu condensatul.

Pentru regim staționar, bilanțul termic pentru evaporatorul considerat poate fi exprimat prin relația:

$$Q_a + Q_b = Q_c + Q_d + Q_e. \tag{122}$$

Se fac următoarele notații:

c_0 — căldura specifică a soluției inițiale, în J/kg · grd;
c_a — căldura specifică a dizolvantului, în J/kg · grd;
c_1 — căldura specifică a soluției concentrate, în J/kg · grd;
h_0'' — entalpia aburului primar, în J/kg;
h_0 — entalpia condensatului, în J/kg;
h_1'' — entalpia vaporilor secundari, în J/kg;
t_0 — temperatura soluției inițiale, în °C;
t_1 — temperatura din evaporator.

Ținînd seama de aceste notații, precum și de debitele notate în figura 144, căldurile care intervin în ecuația (122), neglijînd creșterea temperaturii de fierbere a soluției față de dizolvantul pur ($t' = t$), pot fi exprimate sub forma:

$$V_0 h_0'' + S_0 c_0 t_0 = W_1 h_1'' + P_1 c_1 t_1 + V_0 h_0'. \tag{123}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a simplifica ecuația bilanțului, se consideră valabilă legea aditivității capacităților calorice pentru componentele soluției inițiale (apa evaporată, W_1 și soluția concentrată P_1) adică:

$$S_0 c_0 = P_1 \cdot c_1 + W_1 \cdot c_a \tag{124}$$

sau

$$P_1 c_1 = S_0 \cdot c_0 - W_1 \cdot c_a. \tag{125}$$

Înlocuind expresia (125) în ecuația (123) rezultă:

$$V_0 \cdot h_0'' + S_0 \cdot c_0 \cdot t_0 = W_1 \cdot h_1'' + (S_0 \cdot c_0 - W_1 \cdot c_a) t_1 + V_0 \cdot h_0' \tag{126}$$

sau, grupînd termenii, se obține relația:

$$\boxed{V_0(h_0'' - h_0') + S_0 \cdot c_0 \cdot (t_0 - t_1) = W_1(h_1'' - c_a \cdot t_1),} \tag{127}$$

care reprezintă ecuația bilanțului termic al evaporatorului.

Căldura necesară concentrării soluției $Q = V_0(h_0'' - h_0')$ se calculează din relația (127) scrisă sub forma:

$$Q = S_0 \cdot c_0(t_1 - t_0) + W_1(h_1'' - c_a \cdot t_1) \tag{127'}$$

Suprafața necesară pentru realizarea transferului termic în evaporator se determină cu ajutorul ecuației fundamentale scrise sub forma:

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta t} = \frac{V_0(h_0'' - h_0')}{K(\theta - t_1')} \tag{128}$$

în care:

θ este temperatura aburului primar, în °C;

t_1' — temperatura de fierbere a soluției în evaporator, în °C.

Coeficientul total de transmitere a căldurii K se calculează cu ajutorul ecuației (112), ținîndu-se seama și de crustele depuse de soluție.

Tipuri de evaporatoare. După modul de circulație a soluției în spațiul de fierbere, evaporatoarele se clasifică în trei categorii principale:

— *evaporatoare cu circulație naturală;*
— *evaporatoare cu circulație forțată;*
— *evaporatoare cu film de soluție.*

Evaporatoare cu circulație naturală. Cel mai răspîndit aparat din această categorie este evaporatorul vertical cu tub central de circulație schițat în figura 145. Jumătatea inferioară a acestor aparate reprezintă camera de încălzire, care constă dintr-un fascicul de țevi *2* avînd capetele fixate în două plăci tubulare; în centrul sistemului tubular de încălzire, în axa evaporatorului, este montat tubul de recirculare *3* care are diametrul mult mai mare decît celelalte țevi. Aburul primar intră în spațiul dintre țevi, iar soluția fierbe în țevile sistemului de încălzire. Circulația naturală a soluției în evaporator se datorește încălzirii mai intense a țevilor fierbătoare subțiri (diametru mic, suprafață specifică de încălzire mare) față de încălzirea mai redusă în tubul central (diametru mare, suprafață specifică de încălzire mică).

Jumătatea superioară a aparatului reprezintă spațiul (camera) vaporilor secundari *4*, avînd diametrul puțin mai mare pentru a reduce viteza acestora. Vaporii se degajă din soluție în spațiul de vapori, trec prin separatoarele de picături *5* (diferite șicane) și sînt evacuați din evaporator prin conducta vaporilor secundari.

Scanned with OKEN Scanner

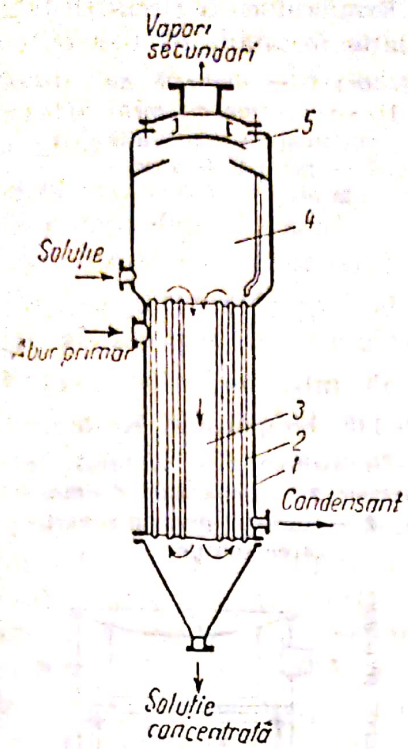


Fig. 145. Evaporator vertical cu tub central de circulație:

1 — manta; *2* — țevile fierbătoare; *3* — tubul central de circulație; *4* — spațiul de vapori; *5* — separator de picături.

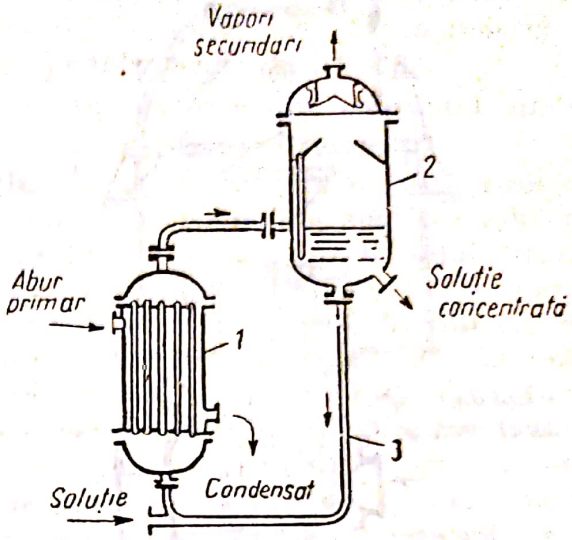


Fig. 146. Schița unui evaporator cu încălzitor exterior:

1 — încălzitor (fierbător) exterior; *2* — separator de lichid; *3* — tub exterior de circulație.

Pentru reducerea înălțimii aparatului și obținerea unor productivități mai mari, s-au realizat evaporatoarele cu încălzitor exterior. Așa cum se observă din figura 146, un asemenea aparat este format dintr-un schimbător de căldură (încălzitorul exterior) și dintr-un separator de lichid. Soluția de concentrat, alimentată la partea inferioară a încălzitorului, în țevile fierbătoare, se transformă într-un amestec soluție-vapori, care se ridică cu viteză mare și intră în separatorul de lichid unde soluția concentrată se separă de vaporii secundari. O parte din soluție este scoasă din separator ca produs final, iar restul este recirculat prin conducta exterioară de circulație.

Evaporatoarele cu circulația naturală a soluției au următoarele avantaje principale: circulație bună a soluției; productivitate bună, montare și demontare ușoară, cost relativ redus.

Dezavantajele lor se referă la: durata mare de rămînere a soluției în evaporator, presiunea hidrostatică mare, consumul mare de metal; nu sînt indicate pentru soluțiile care depun cruste. Pot fi utilizate și pentru soluții care cristalizează.

Evaporatoare cu circulație forțată. Pentru intensificarea circulației soluției în vederea măririi coeficientului de transfer termic, în special pentru soluțiile vîscoase, se folosesc evaporatoarele cu circulație forțată. Circulația soluției într-un astfel de evaporator, așa cum rezultă din figura 147, se realizează cu ajutorul unei pompe *5*, prin intermediul unei conducte exterioare de

Scanned with OKEN Scanner

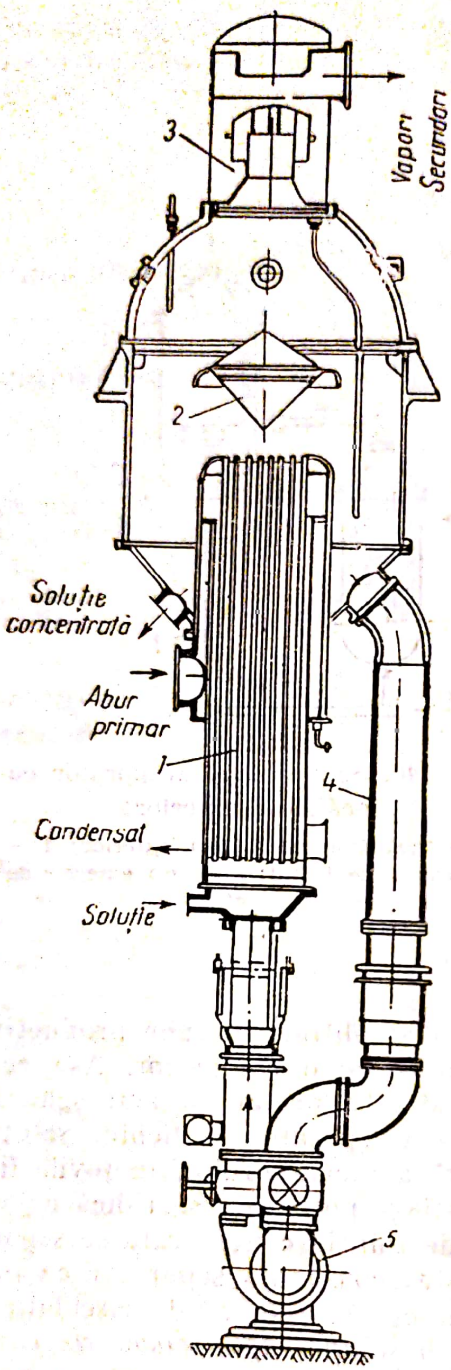
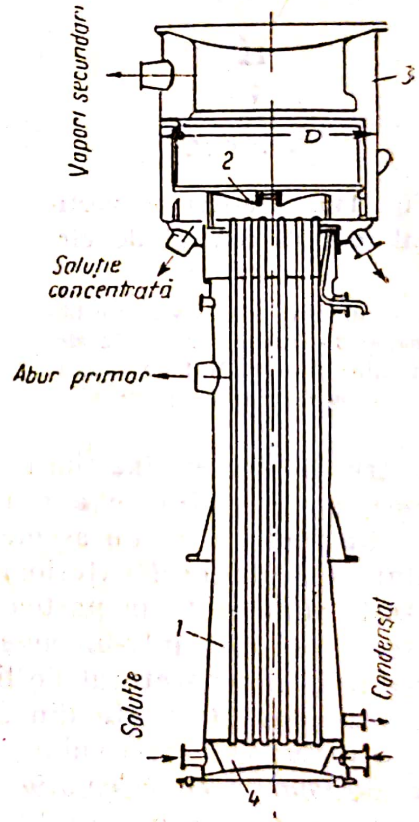


Fig. 147. Evaporator cu circulație forțată:

1 — încălzitor; *2* — umbrelă de deflecție; *3* — separator de picături; *4* — conductă de circulație exterioară; *5* — pompă de circulație.

Fig. 148. Evaporator Kestner:

1 — încălzitor; *2* — umbrelă de deflecție; *3* — separator de picături; *4* — cameră pentru repartizarea soluției.



circulație *4*. Soluția de concentrat se alimentează prin partea inferioară a camerei de încălzire, circulă prin țevile fierbătoare *1* cu o viteză de 1,5—3,5 m/s și începe să fiarbă abia în partea superioară a acestora, ieșind apoi cu o viteză mare în spațiul de vapori al evaporatorului. După ce se lovește de o umbrelă de deflecție *2*, unde are loc o primă separare de lichid și o dirijare a vaporilor, amestecul soluție-vapori este complet separat în urma trecerii vaporilor secundari prin separatorul de picături *3*. Unele evaporatoare din această categorie sînt astfel construite, încît, datorită presiunii hidrostatice, soluția să se supraîncălzească în camera de încălzire, fierberea avînd loc abia la ieșirea în spațiul de vapori, în urma destinderii.

Scanned with OKEN Scanner

Datorită circulației intense a soluției, evaporatoarele cu circulație forțată au coeficienții totali de transfer de căldură de 3—4 ori mai mari decît cele cu circulație naturală. Din această cauză, pot funcționa la diferențe mici de temperatură între aburul primar și temperatura de fierbere a soluției (utilizează abur de presiune joasă).

Sînt recomandate pentru concentrarea soluțiilor cu viscozitate mare, sau a soluțiilor care depun cristale; sînt indicate, de asemenea, *pentru concentrarea soluțiilor corosive care necesită metale speciale pentru construcție.*

Dezavantajul principal al acestor evaporatoare este consumul mare de energie al pompei de circulație.

Evaporatoare cu film de soluție. În aparatele din această categorie, soluția supusă evaporării se găsește sub forma unui film subțire mobil pe o suprafață încălzită; soluția se evaporă în timpul necesar filmului respectiv pentru a parcurge înălțimea suprafeței încălzitoare. În figura 148 este reprezentat un aparat cu film ascendent — evaporatorul Kestner — format din încălzitorul tubular cu țevi lungi *1*, atingînd 6—9 m, și din separatorul de picături *3*. Soluția de concentrat este alimentată la partea inferioară a încălzitorului, printr-un dispozitiv care asigură menținerea nivelului constant al lichidului în țevile fierbătoare. Pentru a asigura o funcționare normală a evaporatorului, țevile fierbătoare se umplu cu soluție numai pînă la 1/4—1/5 din lungimea lor; restul lungimii țevilor fierbătoare este acoperit de filmul de soluție, care se deplasează de jos în sus. Evaporarea soluției are loc astfel într-un film subțire ce se mișcă pe suprafața încălzitoare cu viteză mare (care atinge 20 m/s), ceea ce are ca efect intensificarea transferului de căldură. În partea superioară a aparatului, în separator, vaporii secundari trec prin diferite șicane pentru a se separa de picăturile antrenate, după care sînt evacuați prin conducta de vapori secundari.

Pentru concentrarea soluțiilor vîscoase se utilizează evaporatoarele cu film descendent. În aceste aparate, filmul de soluție format în partea superioară a pereților încălzitori (cilindri sau conducte de diametru mic) curge liber sau este uniformizat cu dispozitive speciale, care, la soluțiile concentrate, împiedică formarea crustelor.

Evaporatoarele cu film de soluție au următoarele avantaje principale: durata de evaporare mică, presiune hidrostatică redusă, coeficienți mari de transfer termic, productivitate mare, cost redus, consum mic de energie. Sînt indicate pentru concentrarea soluțiilor spumante sau vîscoase, a soluțiilor termolabile sau cînd este necesar să se obțină productivități mari.

Dezavantajele acestor aparate sînt: înălțime mare, dificultatea menținerii nivelului optim al soluției în țevile fierbătoare, curățirea dificilă a țevilor fierbătoare, imposibilitatea folosirii pentru soluții care cristalizează sau depun cruste.

2) Evaporarea cu efect multiplu

Acest procedeu de evaporare urmărește realizarea economiei de abur primar pentru încălzire și de apă de răcire pentru condensare, prin utilizarea vaporilor secundari dintr-un evaporator cu abur de încălzire, în evaporatorul imediat următor al unei instalații de evaporare formată din mai multe aparate.

Scanned with OKEN Scanner

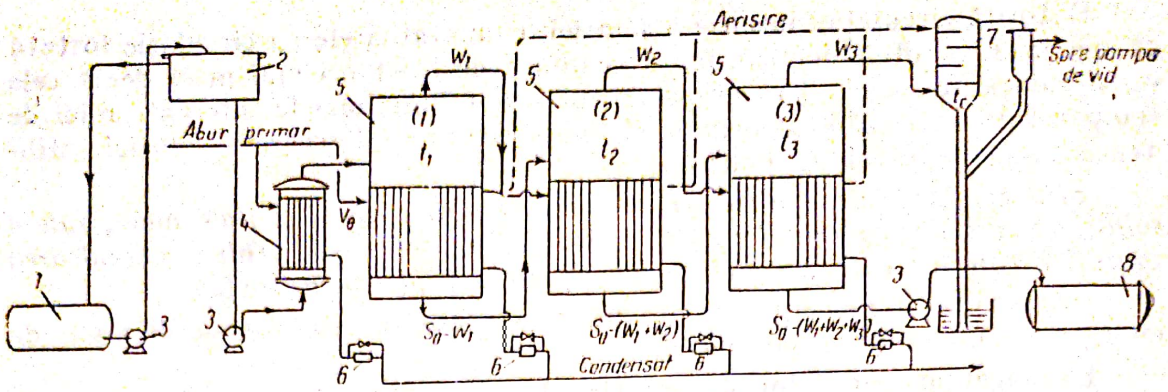


Fig. 149. Instalație de evaporare cu efect multiplu (triplex):
1 — rezervor pentru soluția diluată; *2* — recipient de nivel constant; *3* — pompe; *4* — preîncălzitor pentru soluția diluată; *5* — evaporatoare; *6* — oale de condensat; *7* — condensator barometric; *8* — rezervor pentru soluția concentrată.

Pentru ca aburul secundar dintr-un evaporator să poată fi folosit ca abur de încălzire în evaporatorul imediat următor, este necesar ca temperatura de fierbere a soluției din acesta să fie mai mică deci cea din evaporatorul precedent. Rezultă că într-o instalație de evaporare cu efect multiplu temperaturile și presiunile sînt diferite, scăzînd de la primul către ultimul evaporator. O instalație cu efect multiplu este formată dintr-un număr de evaporatoare (de obicei 3—5), de cele mai multe ori identice, astfel dispuse încît să se asigure circulația soluției între evaporatoare, iar vaporii secundari produși într-un evaporator să poată comunica, printr-o conductă de legătură, cu spațiul de încălzire al evaporatorului următor. Numerotarea evaporatoarelor se face în sensul circulației vaporilor de încălzire. Instalația din figura 149 cuprinde și un preîncălzitor pentru soluția diluată, rezervoare de soluție, precum și un rezervor de presiune situat în partea cea mai înaltă a instalației pentru a asigura alimentarea constantă a evaporatoarelor. Vaporii secundari din ultimul evaporator sînt condensați într-un condensator barometric. Pentru evacuarea gazelor necondensabile din spațiile de încălzire, se prevăd conductele de aerisire care fac legătura cu condensatorul.

Într-o instalație de evaporare cu efect multiplu, primul sau primele evaporatoare lucrează la presiune supraatmosferică, iar ultimul (sau ultimele) sub depresiune (vid), pentru a asigura scăderea temperaturilor $t_1 > t_2 > t_3 > t_n$.

Circulația soluției între evaporatoarele unei instalații cu efect multiplu.

În funcție de alimentarea soluției diluante și de sensul de circulație în raport cu circulația vaporilor de încălzire, se deosebesc următoarele scheme de circulație a soluției: *alimentarea individuală, circulația în curent paralel, circulația în contracurent și circulația în curent mixt.*

În alimentarea individuală, toate evaporatoarele instalației sînt alimentate cu soluție diluată dintr-o conductă comună, și din fiecare evaporator iese soluția cu concentrația finală. Prezintă avantajul lipsei conductelor de legătură pentru soluție dintre evaporatoare, însă are și dezavantajul că în fiecare evaporator, creșterea punctului de fierbere a soluției este maximă.

Circulația în curent paralel este reprezentată în figura 149. După această schemă, soluția diluată este alimentată în primul evaporator, unde se concentrează pînă la o concentrație intermediară C_1; din acesta trece în evaporatorul al doilea, unde atinge concentrația C_2, pînă la ultimul evaporator din

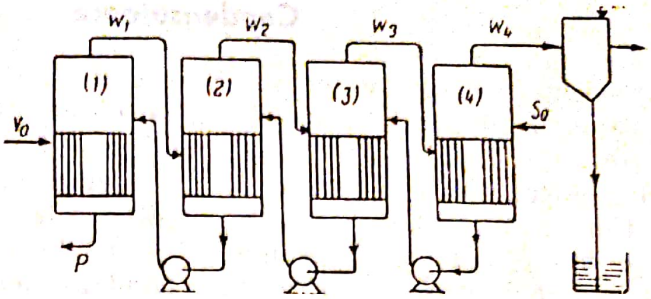


Fig. 150. Circulația soluției în contracurent într-o instalație cu efect multiplu compusă din patru evaporatoare.

care iese cu concentrația finală C_f. Soluția trece dintr-un evaporator în altul liber, fără pompă, datorită diferenței de presiune dintre evaporatoare ($p_1 > p_2 \ldots \rightarrow p_n$). Dezavantajul acestei scheme constă în aceea că soluția de concentrație maximă, deci cu viscozitate mare, se concentrează în ultimul evaporator unde temperatura este minimă, adică în condițiile cele mai defavorabile pentru transmiterea căldurii (coeficient de transfer de căldură mic). Deși această schemă este cea mai des utilizată, ea este indicată pentru evaporări pînă la concentrări finale nu prea mari.

În circulația în contracurent (fig. 150), soluția diluată S_0 este alimentată în ultimul evaporator, de unde trece apoi prin celelalte evaporatoare ale instalației, în sens invers circulației vaporilor secundari V_0, concentrîndu-se treptat pînă la primul evaporator din care iese cu concentrația finală. Trecerea soluției dintr-un evaporator în altul se face cu ajutorul pompelor. *Avantajul principal al acestei scheme constă în aceea că soluția, pe măsură ce se concentrează, trece în evaporatoare cu temperatura din ce în ce mai ridicată, astfel încît valoarea coeficientului total de transmitere a căldurii nu variază prea mult de la ultimul la primul evaporator*; în afară de aceasta, în circulația în contracurent se produce mai puțin abur secundar în ultimul evaporator, reducîndu-se astfel necesarul de apă de răcire în condensator.

Circulația în curent mixt reprezintă o îmbinare între circulația în echicurent și contracurent. Deși există mai multe posibilități de circulație în curent mixt, mai des se utilizează pentru instalațiile cu patru evaporatoare, alimentarea soluției făcîndu-se în ultimul evaporator, de unde trece în primul, continuîndu-se apoi circulația în curent paralel.

Numărul evaporatoarelor dintr-o instalație cu efect multiplu nu poate depăși o oarecare limită, deoarece cu cît numărul evaporatoarelor din instalație este mai mare, cu atît diferența utilă de temperatură pentru fiecare aparat este mai mică.

b. Condensarea

Condensarea este operația prin care vaporii saturați, cedînd căldura de vaporizare, trec în stare lichidă menținîndu-și temperatura constantă. Operația de condensare se aplică fie ca operație de îndepărtare a vaporilor din instalația care i-a produs (evaporare, distilare, uscare), fie pentru recuperarea vaporilor prețioși în stare lichidă (uscare, antrenare cu vapori etc.). Operația de condensare poate fi utilizată de asemenea pentru realizarea și menținerea unei depresiuni într-o instalație; în acest caz, condensarea este însoțită de evacuarea gazelor necondensabile cu ajutorul unei pompe de vid.

Scanned with OKEN Scanner

Condensatoare

Aparatele în care are loc trecerea vaporilor în stare lichidă, în urma cedării căldurii latente de vaporizare, se numesc **condensatoare.** Căldura de vaporizare cedată de vaporii care se condensează este preluată de un fluid de răcire. De obicei, ca fluid de răcire în condensatoare se utilizează apă, iar în ultimul timp a început să se utilizeze, din ce în ce mai mult, aerul.

După modul cum are loc schimbul de căldură între vaporii care condensează şi fluidul de răcire, se deosebesc **condensatoare de suprafaţă şi condensatoare de amestec.** La condensatoarele de suprafaţă, transmiterea căldurii se face indirect, prin intermediul unui perete; la condensatoarele de amestec, transferul de căldură are loc direct, prin amestecarea fluidului de răcire cu vaporii de condensat.

Condensatoarele de amestec realizează un transfer de căldură în condiţii mai economice şi se utilizează atunci cînd vaporii condensaţi nu reprezintă o substanţă preţioasă; condensatoarele de suprafaţă, mai costisitoare, se utilizează cînd se urmăreşte recuperarea vaporilor condensaţi.

Condensatoare de suprafaţă. Pentru condensarea vaporilor unor substanţe utile se folosesc condensatoarele de suprafaţă, tubulare, care sînt schimbătoare de căldură tubulare obişnuite. Apa de răcire circulă prin ţevi iar vaporii prin spaţiul intertubular.

Pentru condensarea vaporilor utili se utilizează de asemenea **condensatoare de suprafaţă spirale** construite ca şi schimbătoarele de căldură respective. Cînd sînt folosite în calitate de condensatoare, schimbătoarele de căldură spirale se construiesc în poziţie verticală (fig. 151), pentru a asigura evacu-

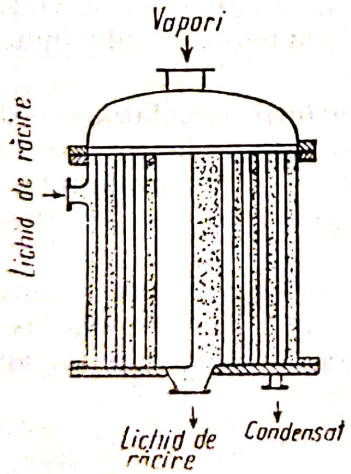


Fig. 151. Condensator de suprafaţă spiral, vertical.

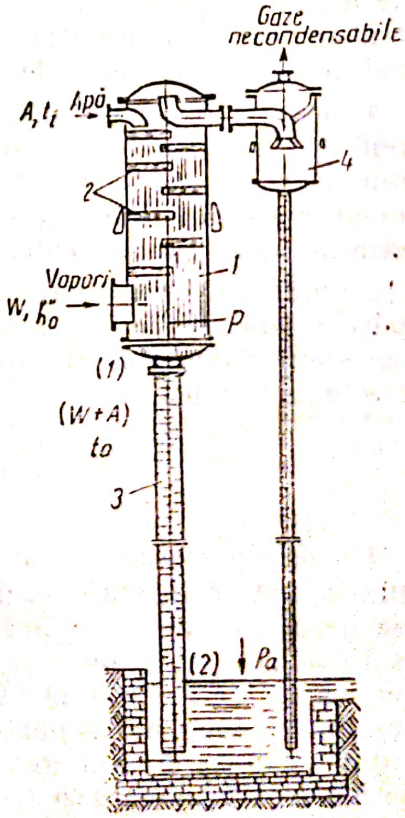


Fig. 152 Condensator barometric:
1 — manta; 2 — poliţe; 3 — conductă barometrică; 4 — separator de picături.

area ușoară a condensatului. În acest condensator, vaporii și condensatul format circulă de sus în jos în direcția axială, iar apa de răcire circulă în spirală de la exterior către interiorul condensatorului. În unele condensatoare spirale, spațiul pentru circulația apei este împărțit în două cu ajutorul unui perete transversal astfel încît apa de răcire parcurge de două ori, în sensuri diferite, spațiul spiral respectiv.

Condensatoarele de amestec. Datorită simplității construcției și a eficienței schimbului de căldură, acestea cunosc o largă răspîndire în industria chimică. Construcția condensatoarelor de amestec urmărește realizarea unui contact cît mai bun între vapori și apa de răcire.

Pentru instalații de evaporare cu capacități mari se utilizează **condensatoare barometrice în contracurent.** Un asemenea condensator este reprezentat în figura 152. La acest condensator îmbunătățirea contactului dintre vaporii de condensat și apa de răcire se realizează cu ajutorul unor șicane în forme de polițe *2*, din tablă perforată. Apa se introduce pe la partea superioară și se scurge sub formă de șuvițe prin orificiile poliților. Șicanele au marginile îndoite, astfel încît pe fiecare poliță se formează o rezervă de lichid, din care o parte se scurge sub formă de șuvițe prin orificii, iar altă parte deversează și se prelinge peste marginea poliței. Vaporii intră în condensator pe la partea inferioară și circulă în contracurent cu apa de răcire. Gazele necondensabile sînt aspirate pe la partea superioară a condensatorului, de către o pompă de vid, prin intermediul unui separator de picături *4*. Condensatul, împreună cu apa de răcire, este evacuat printr-o conductă barometrică *3*. Lungimea conductei barometrice se calculează astfel încît înălțimea coloanei de lichid împreună cu presiunea absolută din condensator să echilibreze presiunea atmosferică; capătul inferior al conductei barometrice pătrunde cu aproximativ 0,5 m în vasul de colectare a condensatului, realizînd în acest mod închiderea hidraulică necesară.

Aplicație

Să se determine debitul vaporilor secundari obținuți prin concentrarea unei soluții de NaOH cu un debit $S_0=25\,000$ kg/h, de la concentrația inițială $C_i=20\,\%$ la concentrația finală $C_f=37{,}60\,\%$.

Debitul vaporilor secundari se calculează cu relația (121):

$$W=S_0\left(1-\frac{C_i}{C_f}\right)=25\,000\left(\frac{0{,}20}{0{,}376}\right)=11\,750 \text{ kg/h}.$$

Debitul soluției concentrate va reprezenta:

$$P=S_0-W=25\,000-11\,750=13\,250 \text{ kg/h}.$$

Verificarea cunoștințelor

1. Ce este evaporarea?
2. Care sînt procedeele de realizare a operației de evaporare?
3. Enumerați factorii care influențează evaporarea.
4. Faceți o comparație între diversele tipuri de evaporatoare.
5. Care sînt avantajele procedeului de evaporare cu efect multiplu?
6. Faceți o comparație între cele trei moduri de circulație a soluției între evaporatoarele unei instalații cu efect multiplu.

Scanned with OKEN Scanner

3. RĂCIREA LA TEMPERATURI JOASE

Pentru realizarea multor procese tehnologice din industria chimică și petrochimică sînt necesare temperaturi mult mai scăzute decît cele obținute cu ajutorul agenților de răcire obișnuiți (apa și aerul). Prin utilizarea unor amestecuri frigorifice (amestecuri de anumite săruri cu gheață) se pot obține, prin răcirea obișnuită (transmiterea căldurii de la temperaturi mai mari la temperaturi mai mici) temperaturi pînă la −50°C. Astfel, amestecul de sare de bucătărie cu gheață (conținînd pînă la 20% NaCl) se topește la −21°C, iar amestecul de clorură de calciu cu gheață (30% $CaCl_2$) la temperatura de −55°C; acest mod de răcire se utilizează în măsură mai mică în industria chimică. Obținerea unor temperaturi mai coborîte necesită aplicarea unor procedee de răcire (răcirea artificială) care realizează transmiterea căldurii de la corpuri cu temperaturi mai joase la alte corpuri sau în mediul înconjurător, cu temperatura mai ridicată. Deoarece la trecerea de la temperaturi mici la temperaturi mari, entropia sistemului scade, asemenea procedee de răcire sînt însoțite de procese suplimentare, a căror energie asigură creșterea sau menținerea constantă a entropiei întregului sistem. *Instalațiile în care se realizează aceste procedee, numite uneori procedee de producere a frigului sau tehnica frigului artificial, se numesc* **instalații frigorifice.**

Se obișnuiește, din motive de convenință, ca după valoarea temperaturilor realizate, instalațiile frigorifice să se împartă în două categorii:

a) *instalații pentru răcire moderată sau frig moderat* (pînă la −100°C);

b) *instalații pentru răcire înaintată* (sub −100°C).

Tehnica actuală a frigului permite obținerea unor temperaturi cu numai cîteva miimi de grad deasupra lui zero absolut.

Pentru răcirea la temperaturi joase (răcirea moderată și răcirea înaintată) instalațiile frigorifice utilizează agenți frigorigeni care transportă căldura de la corpul care se răcește, cu temperatură mai mică, la un alt corp (un lichid de răcire) cu temperatura mai mare. În funcție de procedeul prin care se realizează răcirea agentului frigorigen, procesul suplimentar (condensator) al instalației frigorifice introduce în sistem energie mecanică (comprimare) sau energie termică (încălzire), astfel încît în ansamblu entropia sistemului crește.

Pentru obținerea frigului (răcirea agenților frigorigeni) în vederea răcirii corpurilor, se utilizează următoarele procedee:

— *procedee de evaporare a unor lichide cu temperatură scăzută de fierbere:*

— *procedeul de detentă a gazelor comprimate cu producere de lucru mecanic:*

— *procedeul de destindere* (*laminare*) *a agentului frigorigen gazos.*

Ultimele procedee sînt utilizate, în general, pentru realizarea temperaturilor foarte scăzute (răcirea înaintată).

a. Procedee de răcire prin evaporare

Procedeele de răcire prin evaporare se bazează pe circulația agentului frigorigen într-un ciclu închis între corpul care trebuie răcit — unde agentul frigorigen se evaporă pe seama căldurii Q_0 a corpului rece — și corpul mai cald — unde acesta se condensează — transmițîndu-i căldura îndepărtată

din corpul care se răcește. *Pentru procedeele de răcire prin evaporare, instalațiile frigorifice folosesc ca procese suplimentare* **comprimarea, absorbția și adsorbția agentului frigorigen.**

1) Instalații frigorifice cu comprimare

Producerea frigului în instalațiile cu comprimare utilizează evaporarea agentului frigorigen, după ce în prealabil vaporii acestuia au fost comprimați pînă la o asemenea presiune încît să poată fi condensați prin răcire obișnuită. Prin evaporarea agentului frigorigen lichid se îndepărtează căldura Q_0 din corpul care se răcește. Vaporii astfel obținuți sînt din nou comprimați în compresorul mașinii frigorifice, cedînd apoi în condensator, lichidului de răcire, căldura de condensare luată de la corpul rece, precum și căldura rezultată din creșterea energiei interne în urma comprimării.

Ca agenți frigorigeni mai des folosiți sînt: amoniacul, bioxidul de sulf, bioxidul de carbon, clorura de metil și freonii; pentru temperaturi de vaporizare sub $-70°C$ se utilizează propanul, etanul și etilena.

Amoniacul se utilizează pentru răciri pînă la $-65°C$. Prezintă avantaje legate de volumul mic al cilindrului compresorului, este disponibil și se detectează ușor cînd au loc scăpări. Ca dezavantaje trebuie menționate toxicitatea și posibilitatea de explozie în amestec cu aerul.

Bioxidul de carbon deși necesită cele mai mici volume pentru cilindrul compresorului, prezintă dezavantajul presiunii mari de condensare.

În ultimul timp, o largă utilizare cunosc freonii (derivați fluoroclorurați ai hidrocarburilor parafinice) care sînt netoxici, n-au miros, nu ard și nu prezintă pericol de explozie.

2) Instalații frigorifice cu absorbție

În aceste instalații, ridicarea presiunii vaporilor agentului frigorigen, de la presiunea de vaporizare la presiunea de condensare, se face prin absorbția, și desorbția acestora de către un lichid corespunzător, de obicei apă; spre deosebire de instalația frigorifică cu comprimare care utilizează energia mecanică, instalațiile cu absorbție, pentru realizarea ciclului agentului frigorigen utilizează energia termică necesară desorbției vaporilor din lichidul absorbant. Instalațiile frigorifice cu absorbție folosesc în mod obișnuit drept agent frigorigen amoniacul; sînt recomandate mai ales pentru realizarea unor temperaturi scăzute, pentru care instalațiile cu comprimare ar trebui să funcționeze în două trepte. În figura 153 este reprezentată schema unei instalații frigorifice cu absorbție, cu funcționare continuă. *Comparînd această instalație cu instalația frigorifică cu comprimare rezultă că, în ambele instalații, agentul frigorigen parcurge același ciclu între vaporizator* (preluarea căldurii) și *condensator* (cedarea căldurii). *Deosebirea principală constă în înlocuirea compresorului instalației frigorifice cu comprimare, prin sistemul de absorbție-desorbție al vaporilor agentului frigorigen, sistem format din absorber și fierbător de soluție.*

Pentru unități mai mici se folosesc instalații frigorifice cu absorbție, fără pompă de lichid, cu funcționare discontinuă în două faze — de încălzire și răcire; trecerea de la o fază la alta se face automat, printr-un dispozitiv care acționează asupra apei de răcire și asupra încălzitorului.

Scanned with OKEN Scanner

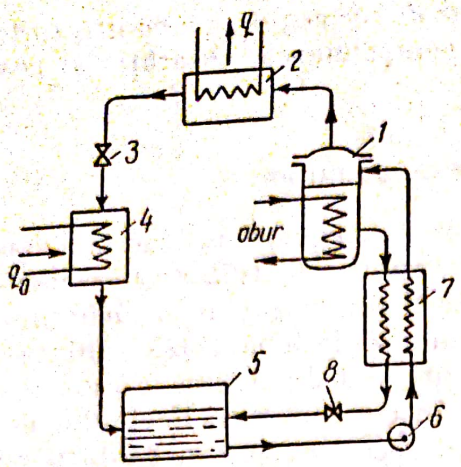


Fig. 153. Instalație frigorifică cu absorbție:

1 — fierbător pentru soluție; *2* — condensator; *3* — ventil de laminare; *4* — vaporizator; *5* — absorber; *6* — pompă; *7* — schimbător de căldură; *8* — robinet de reglare pentru soluție.

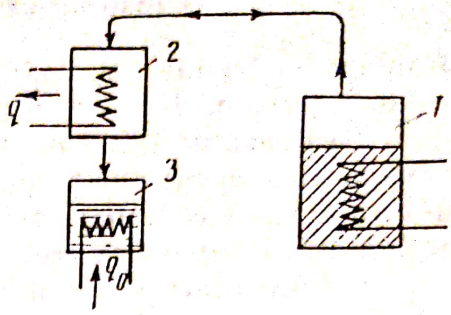


Fig. 154. Instalație frigorifică cu adsorbție:

1 — recipient cu adsorbție; *2* — condensator; *3* — vaporizator.

3) Instalații frigorifice cu adsorbție

Instalațiile frigorifice cu adsorbție sînt foarte asemănătoare cu instalațiile de absorbție, cu funcționare discontinuă. *Agentul frigorigen este bioxidul de sulf, iar ca adsorbant se folosește gelul de silice.* Instalația, a cărei schemă este reprezentată în figura 154 *funcționează în două etape: încălzirea și răcirea.* În etapa de încălzire, vaporii agentului frigorigen sînt desorbiți prin încălzirea recipientului care conține adsorbantul. Vaporii degajați condensează prin răcire cu apă în condensator, de unde lichidul obținut trece în vaporizator, care, în această etapă, are rol de rezervor. În etapa a doua de răcire, se întrerupe încălzirea adsorbantului; datorită scăderii temperaturii, adsorbantul începe să adsoarbă vaporii agentului frigorigen, presiunea acestora în circuit scade și începe vaporizarea lichidului colectat în prima etapă în vaporizator; vaporii rezultați sînt adsorbiți în continuare de către adsorbant. Cele două etape se repetă succesiv.

b. Răcirea înaintată

Răcirea înaintată este utilizată îndeosebi pentru lichefierea gazelor. Lichefierea gazelor, ca: oxigenul, azotul, hidrogenul, heliul etc., care au temperaturi critice mai joase decît —100°C, este posibilă numai cu ajutorul metodelor de răcire înaintată; pentru lichefierea gazelor se utilizează îndeosebi răcirea prin destinderea gazelor reale.

Scanned with OKEN Scanner

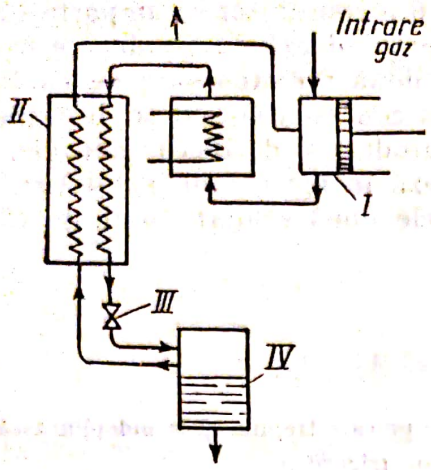


Fig. 155. Schema instalației frigorifice prin destindere prin laminare:

I — compresor; *II* — schimbător de căldură (răcitor); *III* — ventil de laminare; *IV* — rezervor de gaz lichefiat.

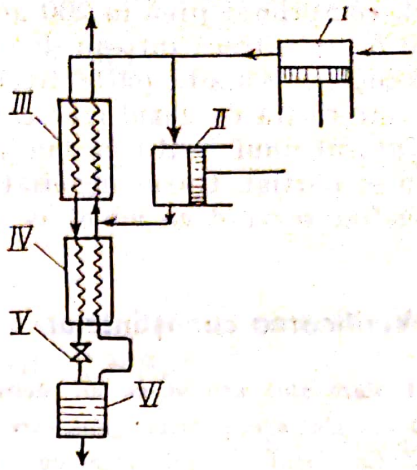


Fig. 156. Instalație frigorifică funcționînd după procedeul Heyland:

I — compresor; *II* — detentor; *III, IV* — schimbătoare de căldură (răcitoare); *V* — ventil de laminare; *VI* — rezervor de gaz lichefiat.

Instalațiile frigorifice cu destindere prin laminare. *Aceste instalații realizează răcirea la temperaturi joase prin expandarea liberă a gazului* (procedeul Linde) (fig. 155) și *se utilizează în special la fabricarea oxigenului*. După acest procedeu, gazul este comprimat de un compresor, este răcit apoi cu apă pînă la temperatura camerei și trecut într-un schimbător de căldură, unde este răcit în continuare de către gazele reci care circulă în contracurent. După ieșirea din schimbătorul de căldură, gazul este expandat (destins) fără producere de lucru mecanic, cu ajutorul unui ventil de laminare. Destinderea se produce pînă la presiunea inițială cu care gazul a intrat în compresor; în urma expandării, se produce o lichefiere parțială iar restul de gaz, după ce servește la răcire în schimbătorul de căldură, poate intra din nou în compresor și ciclul se repetă. Acest ciclu necesită comprimarea la presiuni mari — pînă la 200 at — și necesită un consum mare de energie. Din această cauză, pentru economie de lucru mecanic, se utilizează procesul Linde cu două trepte de comprimare; în prima treaptă gazul se comprimă pînă la 20—50 at, apoi gazul nelichefiat se comprimă în cea de-a doua treaptă pînă la 200 at.

Instalații frigorifice funcționînd prin detentă cu producere de lucru mecanic (Claude). Pentru realizarea unei răciri suficiente fără a lucra la presiuni prea mari, se utilizează expandarea gazului comprimat într-un detentor, cu producere de lucru mecanic. *În practică se utilizează mai mult procedeul Heyland, un procedeu combinat care utilizează presiuni inițiale mari și răcirea atît prin expandare liberă cît și prin expandare de lucru mecanic.* Schema unei asemenea instalații frigorifice este redată în figura 156. În acest procedeu,

Scanned with OKEN Scanner

gazul, comprimat pînă la 200 at, la ieşirea din compresor se împarte în două părţi: o parte trece într-un detentor unde expandează cu producere de lucru mecanic, iar cealaltă parte trece prin cele două schimbătoare de căldură în care este răcită cu gazul rece care circulă în contracurent, şi se destinde liber cu ajutorul unui ventil de laminare, fără producere de lucru mecanic, lichefiindu-se parţial. Gazul lichefiat se colectează în rezervorul instalaţiei, gazul nelichefiat servind ca agent de răcire în cele două schimbătoare de căldură.

Verificarea cunoştinţelor

1. Care sînt procedeele de răcire?
2. Ce sînt agenţii frigorigeni, care sînt condiţiile pe care trebuie să le îndeplinească?
3. Care sînt utilajele principale ale instalaţiilor frigorifice?
4. Descrieţi funcţionarea unei instalaţii frigorifice cu absorbţie.
5. Ce se înţelege prin răcirea înaintată?

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VI

OPERAȚII DE DIFUZIUNE

1. BAZELE TRANSFERULUI DE MASĂ

În industria chimică și petrochimică, un mare număr de procese tehnologice necesită contactul direct al fazelor participante și trecerea, odată cu aceasta, a unor componente dintr-o fază în alta, realizîndu-se astfel un schimb de substanță (de masă) între fazele în contact direct. *Realizarea schimbului de substanță între fazele în contact presupune deplasarea relativă (transportul) a componentelor respective în fiecare fază, deplasare numită* **difuziune,** *direcția de deplasare fiind dată de sensul de variație al concentrației componentelor în fazele respective.* O serie de operații unitare specifice industriei chimice și petrochimice se bazează pe difuziunea unei faze — solide, lichide sau gazoase — în interiorul aceleiași faze sau între două faze în contact direct, realizînd ceea ce se cheamă *transportul sau transferul de masă* (substanță); asemenea operații sînt: **distilarea, rectificarea, absorbția, extracția, adsorbția, uscarea** etc. Aceste operații presupun deplasarea a cel puțin uneia din faze, de obicei faza gazoasă (vapori) sau lichidă și contactul nemijlocit cu cealaltă fază (lichidă sau solidă). Prin contactul nemijlocit al fazelor se formează o interfață (suprafață de contact) prin care are loc difuziunea și a cărei mărime influențează direct viteza operației. *Tuturor acestor operații le sînt comune aceleași legi — care stabilesc sensul și viteza de deplasare a componentelor, a căror concentrație variază în aceeași fază sau între două faze —* **legile difuziunii.**

Difuziunea, în aceeași fază sau între două faze, apare datorită tendinței către echilibrul fizico-chimic al sistemului în care se manifestă diferențe între concentrațiile componentelor respective.

Difuziunea moleculară apare ca rezultat al mișcării dezordonate a moleculelor și constă în deplasarea (transportul) de substanță, în stare moleculară peste un mediu imobil sau în mișcare laminară, perpendicular pe direcția de mișcare. Difuziunea moleculară se exprimă cu ajutorul ecuației lui Fick, analoagă legii lui Fourier pentru transmiterea căldurii prin conducție, lege redată prin ecuația:

$$n_A = -D \frac{dC_A}{dx} A, \tag{129}$$

care exprimă proporționalitatea dintre cantitatea de substanță n_A (de component A) transmisă în unitatea de timp, aria A prin care are loc trecerea substanței și gradientul concentrației, dC_A/dx; semnul minus arată că transportul de masă prin difuziune are loc în sensul în care concentrația scade. Factorul

de proporționalitate D se numește coeficient de difuziune moleculară și are dimensiunile $D=L^2T^{-1}$; unitățile de măsură ale coeficientului de difuziune în sistemul SI sînt m^2/s.

Difuziunea convectivă sau turbulentă rezultă în urma mișcării turbulente a mediului, avînd ca efect deplasarea (transportul) de substanță datorită curenților convectivi care apar. Difuziunea convectivă se exprimă printr-o ecuație analoagă legii lui Fick, în care coeficientul de difuziune moleculară D se înlocuiește prin coeficientul de difuziune convectivă (turbulentă) D_t.

Coeficienții de difuziune au același rol în operațiile de transfer de masă pe care îl are difuzivitatea termică în operațiile de transmitere a căldurii sau viscozitatea cinematică la curgerea fluidelor. Dealtfel, toți acești coeficienți au aceleași dimensiuni L^2T^{-1} și aceleași unități de măsură, m^2/s.

Coeficienții de difuziune în lichide au valori mult mai mici (cu patru ordine de mărime decît cei corespunzători în gaze). Pentru comparație, se prezintă valorile coeficienților de difuziune a unor substanțe la 20°, exprimate în cm^2/s; în gaz (aer) și în lichid (apă): oxigenul în aer, 0,206, în apă, 0,180. $\cdot 10^{-4}$; bioxid de carbon: 0,164 și $0{,}150 \cdot 10^{-4}$; amoniacul: 0,235 și $0{,}176 \cdot 10^{-4}$ etanolul: 0,119 și $0{,}100 \cdot 10^{-4}$.

Ecuațiile transferului de masă. O importanță mai mare pentru industria chimică o au însă operațiile în care difuziunea are loc între două faze, prin traversarea (trecerea) frontierei (interfeței) care separă cele două faze, realizîndu-se ceea ce se numește *transfer de masă sau de substanță*. Intensitatea de desfășurare a acestor operații este definită cantitativ cu ajutorul *coeficienților de transfer de masă*.

Coeficienții parțiali de transfer de masă. Cea mai veche teorie privind mecanismul transferului de masă presupune că de o parte și de alta a interfeței se formează două straturi limită de grosime x_g și x_l în care transferul de substanță se face prin difuziunea moleculară. Concentrația substanței care se transferă variază liniar numai în straturile limită considerate (întreaga rezistență la transferul de masă este concentrată în cele două straturi) așa cum rezultă (prin linii punctate) în figura 157; în afara zonei straturilor limită concentrația rămîne constantă.

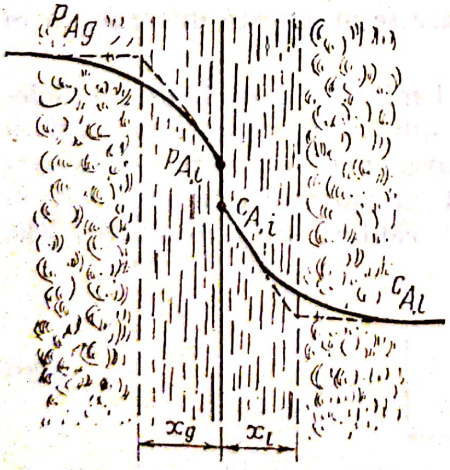


Fig. 157. Profilul variației concentrațiilor la interfața gaz-lichid.

Prin integrarea ecuației lui Fick (190) pentru condițiile straturilor limită formate de o parte și de alta a interfeței dintre un gaz și un lichid reprezentate în figura 157 se obține: pentru filmul de gaz,

$$n_A = k_g A(p_{A,g} - p_{A,i}), \qquad (130)$$

iar pentru filmul de lichid,

$$n_A = k_l A(C_{A,i} - C_{A,l}), \qquad (131)$$

analoage ecuațiilor pentru transmiterea căldurii prin convecție și conducție.

Coeficienții k_g și k_l se numesc coeficienți parțiali de transfer de masă prin filmul gazos și, respectiv, prin filmul lichid.

Scanned with OKEN Scanner

Unităţile de măsură a coeficienţilor parţiali de transfer de masă se deduc din ecuaţiile (130) şi (131) scrise sub forma:

$$n_A = k_g \cdot A \cdot \Delta C_g = k_l \cdot A \cdot \Delta C_l \qquad (132)$$

Unităţile de măsură depind de modul cum se exprimă forţa motrice a operaţiei, şi de diferenţa de concentraţie ΔC. Pentru filmul de gaz, exprimînd concentraţia în kmol/m³ sau în unităţi de presiune, N/m², se obţin succesiv următoarele unităţi ale coeficientului k_g:

$$(k_g) = \left(\frac{n_A}{A \cdot \Delta C}\right) = \frac{\text{kmol/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{kmol/m}^3} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \qquad (133)$$

$$(k_g) = \left(\frac{n_A}{A \cdot \Delta p}\right) = \frac{\text{kmol/s}}{\text{m}^2\text{N/m}^2} = \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{N}}$$

Forţa motrice a operaţiilor de transfer de masă; echilibrul între faze. Operaţiile de transfer de masă întîlnite în industria chimică şi petrochimică au loc în sisteme în care ambele faze sînt fluide: gaz-lichid (absorbţie), vapori-lichid (distilare), lichid-lichid (extracţie), precum şi în sistem în care una din faze este solidă, iar cealaltă este gazoasă sau sub formă de vapori (adsorbţie, uscare), sau lichidă (extracţie, adsorbţie).

Aşa cum s-a mai arătat, transferul de masă între faze are loc numai în lipsa echilibrului între concentraţiile componentei care difuzează, în cele două faze în contact direct. Aşa cum rezultă din figura 157, diferenţa între concentraţia fazei din care difuzează componenta A şi concentraţia la interfaţa în echilibru cu concentraţia feţei, care difuzează $(p_{Ag} - p_{Ai})$ reprezintă forţa motrice parţială în filmul gazos. În mod analog, diferenţa între concentraţia la interfaţă, a fazei lichide în care are loc difuziunea în echilibru şi concentraţia la interfaţa în faza gazoasă din care are loc difuziunea $(C_{A\,i} - C_{A\,l})$ reprezintă forţa motrice (parţială) în filmul lichid. Diferenţa între concentraţia componentei în faza gazoasă din care difuzează şi concentraţia de echilibru corespunzătoare concentraţiei în faza lichidă în care difuzează reprezintă forţa motrice totală a operaţiei raportată la faza gazoasă. Forţa motrice a procesului se poate raporta şi la faza lichidă, reprezentînd diferenţa dintre concentraţia de echilibru în această fază, corespunzătoare concentraţiei componentei în faza gazoasă din care aceasta difuzează şi concentraţia componentei în faza lichidă; cu cît aceste diferenţe sînt mai mari, cu atît operaţia decurge cu o intensitate mai mare.

Echilibrul macroscopic într-un sistem format din două faze între care are loc schimb de substanţă se caracterizează prin constanţa în timp a concentraţiei componentelor care difuzează, atunci cînd presiunea totală şi temperatura sub care se găseşte sistemul nu variază. În condiţiile în care echilibrul este atins, fiecărei concentraţii x în faza în care are loc transferul de substanţă îi corespunde o concentraţie de echilibru y^* în faza din care are loc transferul. Această corespondenţă se poate exprima printr-o relaţie de echilibru:

$$y^* = f(x), \qquad (134)$$

caracteristică atît fiecărui sistem în parte (depinde de natura fazelor în contact), cît şi substanţei care se transferă. Prin reprezentarea grafică a ecuaţiilor de echilibru (134) într-un sistem de coordonate corespunzător concentra-

Scanned with OKEN Scanner

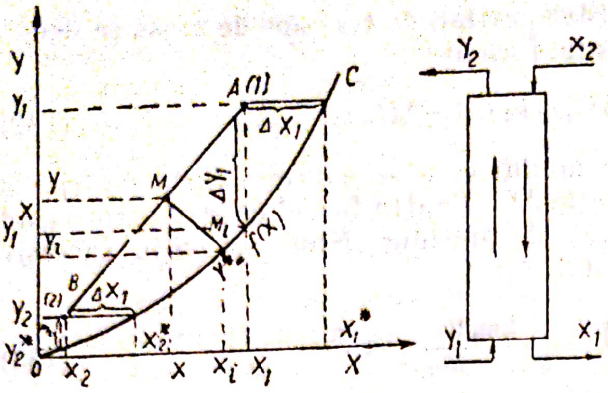


Fig. 158. Diagrama de echilibru pentru coloanele de absorbție.

ției în cele două faze, se obține diagrama de echilibru în care echilibrul dintre compozițiile celor două faze se exprimă printr-o linie, dreaptă sau curbă, numită *linie de echilibru*. În figura 158 s-a reprezentat grafic echilibrul între faza pentru sistemul gaz-lichid, în cazul absorbției unui gaz în apă, obținîndu-se linia de echilibru OC care reprezintă compozițiile celor două faze de echilibru, concentrațiile fiind exprimate în rapoarte molare Y, X.

Operațiile de absorbție, ca și celelalte operații de transfer de masă, se realizează prin circulația în contracurent a celor două faze în aparate speciale, de obicei coloane cu talere sau umplutură (rectificare, absorbție și extracție). În lungul coloanei în care are loc operația, concentrațiile celor două faze diferă de concentrațiile de echilibru, altfel transferul de masă nu ar avea loc. Concentrațiile celor două faze în lungul coloanei, numite *concentrații de lucru sau de operație*, sînt reprezentate prin linia de operație; în cazul absorbției, linia de operație este o dreaptă care trece prin punctele corespunzătoare concentrațiilor în cele două faze la vîrful (2) și la baza coloanei (1) Y_2, X_2 și Y_1, X_1. Așa cum se observă din figura 158, forța motrice totală a operației poate fi exprimată fie pentru faza gazoasă, fie pentru faza lichidă. Pentru faza gazoasă, forța motrice la baza coloanei reprezintă diferența $\Delta Y_1 = Y_1 - Y_1^*$, iar la vîrful coloanei, diferența $\Delta Y_2 = Y_2 - Y_2^*$; pentru faza lichidă, forțele motrice la capetele coloanei reprezintă $\Delta X_1 = X_1^* - X_1$ și $\Delta X_2 = X_2^* - X_2$. Concentrațiile la interfață, într-un punct oarecare M de coordonate Y, X, în lungul coloanei, se determină ducînd din acest punct o dreaptă, avînd panta:

$$-\frac{k_l}{k_g} = \frac{Y - Y_i}{X_i - X}. \qquad (135)$$

Coordonatele punctului M_i de intersecție al acestei drepte cu linia de echilibru reprezintă concentrațiile Y_i și X_i la interfață; forța motrice a operației respective în acest punct poate fi exprimată fie pentru filmul gazos $\Delta Y = Y - Y_i$, fie pentru filmul lichid, $\Delta X = X_i - X$. Așa cum rezultă din diagrama din figura 158, forța motrice, ca și diferența de temperatură într-un schimbător de căldură, variază în lungul coloanei. Ca și la transmiterea căldurii cînd forța motrice variază prea mult, se lucrează cu o forță motrice medie logaritmică:

$$(\Delta Y)_m = \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{2{,}3 \log \frac{\Delta Y_1}{\Delta Y_2}}; \quad (\Delta X)_m = \frac{\Delta X_1 - \Delta X_2}{2{,}3 \log \frac{\Delta X_1}{\Delta X_2}}. \qquad (136)$$

Cînd variația forței motrice în lungul coloanei nu este prea mare, se poate lucra cu forța motrice medie aritmetică.

Coeficienții totali de transfer de masă. De cele mai multe ori, ca și temperaturile pereților sau temperatura dintre straturi la transferul termic, con-

centraţiile la interfaţa dintre cele două faze nu sînt cunoscute. De aceea se obişnuieşte să se calculeze debitul de substanţă transferată n_A, exprimînd forţa motoare nu în funcţie de concentraţiile la interfaţa, $p_{A,i}$ şi $C_{A,i}$, ci în funcţie de valorile lor la echilibru, p_A şi C_A, care rezultă din relaţii de forma:

$$p_A = m \cdot C_A \tag{137}$$

În acest caz în locul coeficienţilor parţiali de transfer k_g şi k_l se utilizează coeficienţii totali K_g şi K_l, iar relaţiile (130) şi (131) iau forma:

$$n_A = K_g \cdot A(p_{A,g} - p_A) \tag{138}$$

$$n_A = K_l \cdot A(C_A - C_{A,l}) \tag{139}$$

în care:

p_A este concentraţia fazei gazoase în echilibru cu faza lichidă;

C_A — concentraţia fazei lichide în echilibru cu faza gazoasă.

Valorile coeficienţilor totali de transfer de masă raportaţi la faza gazoasă, K_g şi, respectiv, la faza lichidă, K_l, rezultată din relaţiile:

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{k_g} + \frac{m}{k_l}}$$

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{mk_g} + \frac{1}{k_l}} \tag{140}$$

Coeficienţii totali de transfer de masă au aceleaşi unităţi de măsură ca şi coeficienţii parţiali de transfer.

Dacă forţele motrice sînt variabile în lungul coloanei (aparatului) în care are loc operaţia, atunci se lucrează cu forţe motrice medii calculate cu ecuaţia (136); în acest caz ecuaţiile respective iau forma generală:

$$n_A = K_g \cdot A(\Delta p)m; \quad n_A = K_l \cdot A(\Delta C)m, \tag{141}$$

forţele motrice medii putînd fi exprimate în orice alte unităţi.

Aplicaţii

Exerciţiul 1. Să se calculeze forţa motrice la vîrful coloanei pentru absorbţia amoniacului în apă la temperatura $t=20°C$.

Se dau presiunea parţială a amoniacului în faza gazoasă $p_{Ag}=0{,}04$ atm; concentraţia amoniacului în apa în care are loc absorbţia $x_A=0{,}001$; panta m din ecuaţia (203), $m=2{,}74$ atm.

Rezolvare

Forţa motrice la vîrful coloanei Δp, exprimată în unităţi de presiune, se calculează din diferenţa $\Delta p_2 = p_{A,g} - p_A^*$. Presiunea de echilibru se calculează cu ajutorul relaţiei:

$$p_A^* = m \cdot x_A = 2{,}74 \times 0{,}001 = 0{,}00274 \text{ atm.}$$

Forţa motrice la vîrful coloanei va avea valoarea:

$$\Delta p_2 = p_{A,g} - p_A^* = 0{,}04 - 0{,}00274 = 0{,}03626 \text{ atm.}$$

Scanned with OKEN Scanner

Exercițiul 2. Să se calculeze coeficienții totali de transfer de masă K_g și K_l pentru absorbția SO_2 în apă. Se dau: coeficientul parțial de transfer de masă în filmul gazos, $k_g = 83{,}2$ kg/m² · h · atm; coeficientul parțial în filmul lichid $k_l = 0{,}438$ kg/m² · h · kg/m³; panta liniei de echilibru $m = 3{,}15 \cdot 10^{-4}$ atm/kg/m³.

Rezolvare

Se utilizează ecuațiile 140.

Înlocuind valorile date se obține pentru coeficientul total de transfer de masă raportat la faza gazoasă K_g, valoarea:

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{k_g} + \frac{m}{k_l}} = \frac{1}{\frac{1}{83{,}2} + \frac{3{,}15 \times 10^{-4}}{0{,}438}} = 52 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}.$$

În mod analog, pentru coeficientul total de transfer de masă raportat la faza lichidă, se obține valoarea:

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{m \cdot k_g} + \frac{1}{k_l}} = \frac{1}{\frac{1}{3{,}15 \times 10^{-4} \times 83{,}2} + \frac{1}{0{,}438}} = 0{,}163 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kg/m}^3.$$

Ca și la transmiterea căldurii, valoarea coeficientului total de transfer de masă este inferioară valorii oricăruia din coeficienții parțiali de transfer (rezistențele se însumează).

Verificarea cunoștințelor

1. Ce este difuziunea? Dați cîteva exemple.
2. Ce sînt coeficienții parțiali de transfer de masă?
3. Cum se exprimă forța motrice a operațiilor de transfer de masă?
4. Ce reprezintă linia de operație?

2. DISTILAREA ȘI RECTIFICAREA

Distilarea reprezintă una din cele mai răspîndite operații de separare a amestecurilor de lichide și a amestecurilor de gaze lichefiate; ca rezultat al operației se obține separarea amestecului lichid în componentele relativ pure sau în fracțiuni de compoziții diferite. *Operația de distilare constă în încălzirea amestecului lichid pînă la fierbere, îndepărtarea vaporilor formați și condensarea lor. Separarea unui amestec omogen de lichide prin distilare se bazează pe diferența între temperaturile de fierbere și între presiunile de vapori (volatilitățile) ale componentelor pure*, datorită cărora, compoziția vaporilor în echilibru cu amestecul lichid diferă de compoziția lichidului; prin distilare faza de vapori se îmbogățește în componenta mai volatilă.

Pentru exemplificare, se consideră un amestec lichid binar, format din componentele A și B, în care componenta A (1), avînd temperatura de fierbere mai mică și volatilitatea mai mare, reprezintă componenta ușoară (mai ușor volatilă), iar componenta B (2), avînd temperatura de fierbere mai mare și volatilitatea mai mică, reprezintă componenta grea (mai greu volatilă). Prin fierberea unui asemenea amestec, componenta ușoară va trece în mare măsură în fază de vapori, care sînt îndepărtați și condensați, iar componenta

Scanned with OKEN Scanner

grea va rămîne mai mult în stare lichidă; *fracțiunea obținută prin condensarea vaporilor se numește* **distilat,** iar *fracțiunea lichidă reprezintă* **reziduul.** Operația astfel realizată se numește *distilare simplă* și are ca rezultat o separare slabă a celor două componente: îmbogățirea distilatului în componenta ușoară și a reziduului în componenta grea.

Pentru obținerea unui grad înaintat de separare a celor două componente se folosește **rectificarea,** *care reprezintă o distilare simplă repetată de un număr mare de ori în aparate speciale* — **coloane de rectificare.** În coloanele de rectificare, vaporii obținuți prin distilare circulă în contracurent cu o parte din lichidul rezultat prin condensarea vaporilor în condensator, numit *reflux*; restul lichidului rezultat în condensator se evacuează din coloană ca distilat. Prin contactul în contracurent dintre vapori și reflux în lungul coloanei se realizează continuu o vaporizare a componentei volatile din lichid (îmbogățirea fazei de vapori în componenta ușoară) și o condensare parțială a componentei mai greu volatile din vapori (îmbogățirea fazei lichide în componenta grea). Vaporii astfel obținuți ajung ca în vîrful coloanei să conțină aproape numai componenta ușor volatilă și sînt condensați în exterior într-un *condensator*; din blazul coloanei se evacuează continuu reziduul îmbogățit în componenta greu volatilă. Amestecul care trebuie separat nu se introduce în blazul coloanei, ci pe un anumit taler, corespunzător compoziției sale.

a. Echilibrul lichid-vapori

Spre deosebire de un lichid pur care fierbe la o temperatură constantă caracteristică presiunii sub care are loc fierberea, temperatura de fierbere a unui amestec lichid, format din mai multe componente, depinde atît de presiunea sub care are loc fierberea, cît și de compoziția lichidului; amestecul lihid va începe să fiarbă cînd suma presiunilor parțiale ale componentelor devine egală cu presiunea sub care se găsește amestecul. Sub o presiune constantă, temperatura de fierbere a amestecului crește odată cu evaporarea componentelor mai volatile, ca rezultat al îmbogățirii fazei lichide în componentele cu temperaturi de fierbere mai ridicate.

Pentru studierea echilibrului lichid-vapori se utilizează atît relații analitice de echilibru și metode grafice, îndeosebi diagrame, cum sînt diagrama presiunilor, diagrama de fierbere și diagrama de echilibru.

În funcție de modul de acțiune a forțelor intermoleculare și de solubilitățile componentelor constituente, se deosebesc **amestecuri ideale, amestecuri neideale, amestecuri nemiscibile și amestecuri parțial miscibile.**

1) Amestecuri ideale

Presiunea parțială a fiecărei componente deasupra unui amestec ideal lichid depinde de temperatura de fierbere și concentrația sa în amestec. Pentru amestecurile ideale, relația de echilibru dintre presiunea parțială a fiecărei componente, $p_1, p_2 \ldots p_n$ și concentrația acestora în faza lichidă $(x_1, x_2 \ldots x_n)$ este dată de legea lui Raoult, conform căreia presiunea parțială a unei componente deasupra unui amestec ideal, este egală cu produsul dintre presiunea

Scanned with OKEN Scanner

de vapori a componentei pure, la temperatura de fierbere a amestecului, și fracția molară a acesteia în amestec x_n:

$$p_n = P_n x_n, \tag{142}$$

în care, P_n reprezintă presiunea de vapori a componentei n în stare pură, la temperatura de fierbere a amestecului.

Pentru un amestec binar format din componenta (1) ușor volatilă și componenta (2) mai greu volatilă, ținînd seama că $x_1 + x_2 = 1$, se obține:

$$p_1 = P_1 x_1 \tag{143}$$

$$p_2 = P_2 x_2 = P_2(1 - x_1), \tag{144}$$

P_1 și P_2 fiind presiunile de vapori ale celor două componente, în stare pură, la temperatura de fierbere a amestecului.

Pentru compoziția vaporilor, aplicînd ecuația $y_n = p_n/p$, p fiind presiunea totală sub care fierbe amestecul, se obține din ecuațiile (143) și (144):

$$y_1 = \frac{p_1}{p} = \frac{P_1}{p} x_1 \tag{145}$$

$$y_2 = \frac{p_2}{p} = \frac{P_2}{p} x_2 = \frac{P_2}{p}(1 - x_1). \tag{146}$$

Prin adunarea ecuațiilor (143) și (144), ținînd seamă că suma presiunilor parțiale este egală cu presiunea totală, $p_1 + p_2 = p$, rezultă:

$$p = P_1 x_1 + P_2(1 - x_1), \tag{147}$$

din care se poate calcula fracția molară x_1 în funcție de presiunea totală p sub care are loc fierberea și presiunile de vapori P_1, P_2 ale componentelor pure.

$$\boxed{x_1 = \frac{p - P_1}{P_1 - P_2}.} \tag{148}$$

Pentru compoziția vaporilor, ținînd seama de ecuația (145) rezultă:

$$\boxed{y_1 = \frac{P_1}{p} x_1 = \frac{P_1}{p} \cdot \frac{p - P_2}{P_1 - P_2}.} \tag{149}$$

Relațiile (148) și (149) servesc la calcularea compozițiilor de echilibru cînd se cunosc presiunile de vapori ale componentelor amestecului.

Aprecierea posibilității de separare a componentelor unui amestec se face cu ajutorul **volatilității relative** α, **definită** *ca raportul:*

$$\boxed{\alpha = \frac{P_1}{P_2}.} \tag{150}$$

Cu cît valoarea numerică a volatilității relative α este mai mare, cu atît separarea celor două componente, prin distilare, se face mai ușor.

Scanned with OKEN Scanner

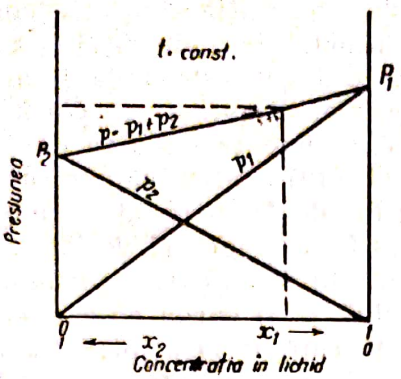


Fig. 159. Diagrama presiunilor pentru un amestec ideal.

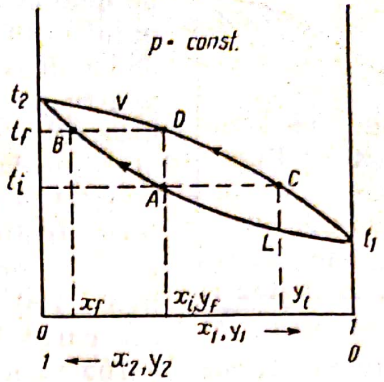


Fig. 160. Diagrama de fierbere pentru un amestec binar.

Pentru amestecurile ideale, cu ajutorul relațiilor deduse din legea lui Raoult se poate obține relația lui Fenske:

$$y_1 = \frac{\alpha \cdot x_1}{1+(\alpha-1)x_1}, \tag{151}$$

utilizată pentru calculul compozițiilor de echilibru pentru amestecuri ideale, a căror volatilitate relativă α este constantă în intervalul de temperatură în care are loc fierberea.

Pentru amestecuri multiple ideale, înțelegînd prin această denumire amestecurile formate din mai multe componente, cunoscute ca natură chimică și compoziție — ca de exemplu amestecurile petroliere — relația (142) rămîne valabilă pentru fiecare componentă, iar relația (154) se poate scrie pentru fiecare componentă sub forma:

$$y_n = \frac{p_n}{p} x_n = K_n \cdot x_n, \tag{152}$$

în care K_n reprezintă *constanta de echilibru.*

Valoarea constantei de echilibru K_n depinde de natura componentei, de natura amestecului, de temperatură și de presiune; această valoare a fost calculată pentru amestecurile de hidrocarburi mai des întîlnite și se găsesc în literatura de specialitate sub formă de tabele și diagrame.

Diagrama presiunilor. Pentru amestecuri ideale, diagrama presiunilor se obține prin reprezentarea grafică a ecuațiilor (143) și (144), rezultînd astfel graficul din figura 159. Așa cum rezultă din legea lui Raoult, variația presiunilor parțiale funcție de concentrație este reprezentată prin cîte o dreaptă care trece prin originea axelor de coordonate; tot printr-o linie dreaptă, care unește punctele $p = P_2$ pentru $x_1 = 0$ și $p = P_1$ pentru $x_1 = 1$, este reprezentată și variația presiunii totale p. Așa cum rezultă din diagramă, *compoziția amestecului care fierbe sub o presiune oarecare p corespunde abscisei punctului p considerat pe dreapta presiunii totale.*

Diagrama de fierbere. Deoarece temperatura de fierbere a unui amestec omogen de lichide nu este constantă, ci depinde de compoziția amestecului, rezultă că și temperaturile de condensare a vaporilor variază în timpul operației

Scanned with OKEN Scanner

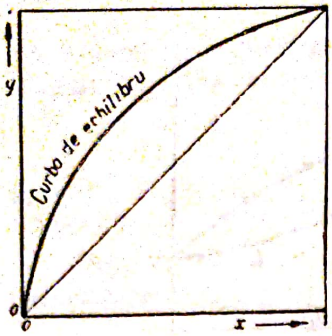


Fig. 161. Diagrama de echilibru.

de distilare. Variaţia temperaturii de fierbere a lichidului în funcţie de compoziţia sa x_1 şi a temperaturii de condensare în funcţie de compoziţia y_1 a vaporilor pentru un amestec binar este redată cu ajutorul diagramei de fierbere. Diagrama se construieşte cu ajutorul datelor experimentale sau cu date calculate cu relaţiile (148) şi (149) pentru temperaturi cuprinse între temperaturile de fierbere ale componentelor pure. Se obţine astfel o diagramă de forma celei din figura 160, formată din două curbe: curba de fierbere sau curba lichidului, L, şi curba de condensare, sau curba vaporilor, V, care variază între temperaturile t_1 şi t_2 de fierbere ale componentelor pure. Un amestec avînd compoziţia x_i va începe să fiarbă la temperatura t_i, vaporii obţinuţi avînd compoziţia y_i. Deoarece în timpul fierberii lichidului sărăceşte în componenta volatilă, temperatura sa de fierbere creşte; în acelaşi timp are loc şi scăderea compoziţiei vaporilor în componenta volatilă. Fierberea se termină în punctul D, avînd temperatura t_f şi compoziţia vaporilor y_f egală cu compoziţia iniţială a amestecului, $y_f = x_i$. Dacă vaporii obţinuţi sînt supuşi condensării, temperatura lor de condensare este egală cu temperatura finală t_f a fierberii; temperatura finală de condensare a vaporilor va fi egală cu temperatura iniţială de fierbere.

Diagrama de echilibru. Această diagramă are în abscisă compoziţia lichidului x, iar în ordonată compoziţia vaporilor y în echilibru cu lichidul; axele de coordonate se divizează în intervalul 0—1. Dependenţa între compoziţia vaporilor y în echilibru şi lichidul de compoziţie x este redată de curba de echilibru; pe diagramă se trasează, de asemenea, şi diagonala avînd ecuaţia $y = x$. Curba de echilibru, al cărei aspect general este redat în figura 161, se construieşte, cu date experimentale sau cu datele calculate cu relaţiile (148) şi (149). Pentru amestecuri ideale a căror volatilitate relativă α se poate considera constantă, construirea diagramei de echilibru se poate face cu ajutorul relaţiei lui Fenske, redată de ecuaţia (151). *Cu cît volatilitatea relativă a componentelor este mai mare, cu atît curba de echilibru este mai depărtată de diagonală şi separarea amestecului respectiv se face mai uşor.*

2) Amestecuri neideale

În aceste amestecuri, forţele intermoleculare ale componentelor pure diferă de forţele intermoleculare ale amestecului. Datorită variaţiei forţelor intermoleculare ale amestecului cu compoziţia, aceste amestecuri se abat de la legea lui Raoult. Cînd valorile coeficienţilor de activitate nu diferă mult de unitate, *pentru a corecta această abatere, se folosesc* **coeficienţii de activitate** γ_1 şi γ_2 *cu care se înmulţeşte presiunea componentei pure* P. În acest mod, toate relaţiile stabilite pentru amestecurile ideale, rămîn valabile cu condiţia ca acestea să fie corectate cu coeficienţii de activitate γ oriunde intervin presiunile de vapori P.

Scanned with OKEN Scanner

Cînd însă valorile coeficienţilor de activitate diferă mult de unitate, apar diferenţe importante atît în relaţiile de echilibru, cît şi în graficele utilizate pentru studiul echilibrului.

Amestecurile ai căror coeficienţi de activitate diferă mult de unitate sînt numite **amestecuri azeotropice.** Diagramele acestora diferă mult de diagramele amestecurilor ideale, datorită apariţiei în diagrama presiunilor unui maximum sau minimum, căruia îi corespunde în diagrama de fierbere un minimum sau, respectiv, un maximum, iar în diagrama de echilibru, curba de echilibru intersectează diagonala într-un punct de compoziţie $x=y$ — *compoziţe azeotropică.*

După valoarea coeficienţilor de activitate se deosebesc amestecurile azeotropice pozitive, care au $\gamma>1$ şi deci $\log\gamma>0$ *şi amestecuri azeotropice negative,* care au $\gamma<1$ şi deci $\log\gamma<0$.

Amestecurile azeotropice pozitive prezintă în diagrama de fierbere un punct minim de fierbere, iar amestecurile negative, un punct maxim de fierbere; temperatura minimă sau maximă corespunde egalităţii compoziţiilor cu cele două faze $x=y$.

Ca exemplu de amestecuri azeotropice pozitive se pot da: amestecul alcool etilic-apă, avînd compoziţia azeotropică $x=0{,}8943$ (sau 95,6%) şi punctul de fierbere $t_f=78{,}15°C$, acetonă-alcool metilic, acetat de etil-alcool etilic etc. Amestecurile azeotropice negative sînt mai puţin numeroase şi reprezintă amestecuri organice, acetonă-cloroform etc.

3) Amestecuri nemiscibile şi parţial miscibile

Într-un amestec nemiscibil fiecare componentă se comportă ca şi cum ar fi singură, presiunea parţială a acesteia nu este influenţată de prezenţa celeilalte componente ci este egală cu presiunea sa de vapori la temperatura respectivă:

$$p_1=P_1;\quad p_2=P_2 \tag{153}$$

Amestecul va fierbe la temperatura pentru care suma presiunilor parţiale ale componentelor va egala presiunea sub care se găseşte amestecul.

Proprietăţile amestecurilor nemiscibile sînt utilizate la distilarea prin antrenare cu vapori.

b. Metode de distilare

Metodele de distilare utilizate în industria chimică şi petrochimică cuprind distilarea simplă, distilarea integrală şi antrenarea cu vapori.

Distilarea simplă. Pentru realizarea distilării simple, amestecul lichid ce urmează să fie separat se încarcă în recipientul de fierbere numit *blază de distilare* şi se încălzeşte cu vapori sau electric pînă la temperatura de fierbere. După începerea fierberii, vaporii rezultaţi sînt evacuaţi din blaza de distilare *1*, şi condensaţi într-un condensator exterior *2* (fig. 162); lichidul rămas — reziduul — se evacuează din blază la sfîrşitul distilării. Caracteristica principală a distilării simple este îndepărtarea vaporilor din spaţiul de fierbere, pe măsură ce se formează. *Lichidul obţinut prin condensarea vaporilor reprezintă*

Scanned with OKEN Scanner

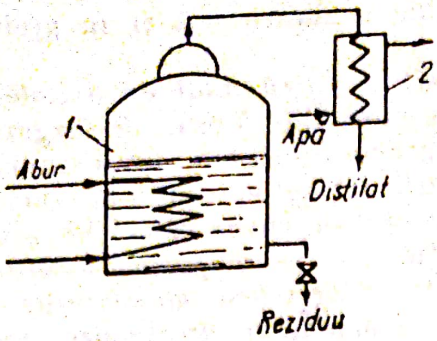


Fig. 162. Schema unei instalații pentru distilarea simplă:
1 — blaz; *2* — condensator.

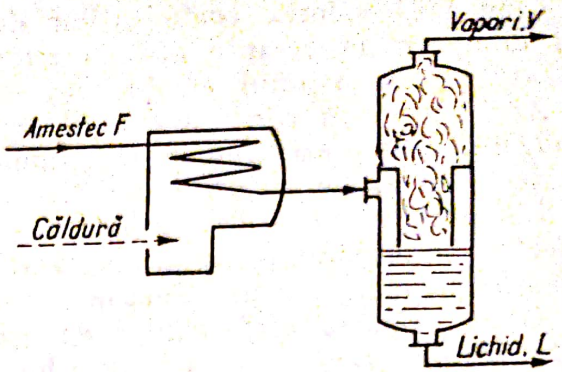


Fig. 163. Schema distilării integrale.

distilatul sau fracțiunea ușoară iar reziduul din blaz, fracțiunea grea. În distilarea simplă, compoziția vaporilor, egală cu compoziția distilantului, scade continuu în componenta volatilă, de la începutul către sfîrșitul operației; reziduul se îmbogățește continuu în componenta greu volatilă. Distilarea simplă se aplică ca metodă de separare prealabilă a amestecurilor sau atunci cînd temperaturile de fierbere ale componentelor sînt foarte diferite (volatilități relative foarte mari) astfel încît se poate realiza o separare mai înaintată a componentelor. *O îmbunătățire a separării prin distilarea simplă se realizează prin culegerea separată din condensator a unor porțiuni de distilat, obținîndu-se fracțiuni de compoziție diferită; în acest caz distilarea se numește* **distilare fracționată.**

Distilarea de echilibru sau integrală. Această metodă de distilare constă în încălzirea amestecului pînă la punctul de fierbere și fierberea (evaporarea) amestecului pînă la realizarea raportului necesar (grad de distilare) între faza de vapori și lichidul inițial. *Caracteristica distilării de echilibru constă în aceea că vaporii formați în timpul fierberii sînt menținuți în contact cu faza lichidă din care au provenit, găsindu-se continuu în echilibru cu aceasta.* Distilarea de echilibru se utilizează mult ca operație continuă la distilarea țițeiului. Țițeiul este încălzit în țevile cuptorului tubular pînă la realizarea proporției dorite de vapori; separarea celor două faze, care se găsesc în continuu în echilibru, se realizează după ieșirea din țevile cuptorului tubular (fig. 163).

Gradul molar de distilare e se definește ca raportul dintre cantitatea (în mol) de vapori formați, V și cantitatea inițială (în mol) de amestec, F. Din bilanțul de materiale se deduce relația:

$$\boxed{\frac{V}{F} = \frac{x_i - x}{y - x} = e} \qquad (154)$$

în care:

x_i este compoziția inițială a lichidului;

y, x — compozițiile, în echilibru, ale celor două fraze.

Antrenarea în vapori constă în introducerea în amestecul lichid a vaporilor unei substanțe nemiscibile (de obicei vapori de apă) cu componentele ce urmează a fi separate în scopul reducerii temperaturii de fierbere. După atingerea

Scanned with OKEN Scanner

temperaturii de fierbere care este mai mică decît temperatura de fierbere a fiecărei componente în parte, vaporii introduși distilă împreună cu componenta volatilă (o antrenează).

Antrenarea cu vapori se utilizează la purificarea unor substanțe organice termolabile sau cu temperatură înaltă de fierbere, deoarece acestea sînt protejate, ferite de descompunerea vaporilor antrenați sau gazului inert.

c. Rectificarea

Așa cum s-a arătat, rectificarea este o metodă perfecționată de distilare prin care cele două faze, lichidă și de vapori, se îmbogățesc continuu în componentele mai greu volatile, și respectiv ușor volatile, ca rezultat al unei succesiuni de distilări și condensări repetate în aparate speciale — *coloane de rectificare*. Rectificarea, ca operație de separare înaintată, se aplică atît amestecurilor binare, cît și amestecurilor multiple. *După modul de efectuare, rectificarea poate fi* **continuă,** *decurgînd în regim staționar, și* **discontinuă,** *în regim nestaționar.*

Aparatele în care se efectuează operațiile de rectificare, coloanele de rectificare, prin construcția lor caută să asigure un contact cît mai perfect între cele două faze care circulă în contracurent. În figura 164 este reprezentată schema unei instalații de rectificare conținînd o coloană de rectificare cu talere. Așa cum rezultă din această schemă, elementele constitutive principale ale unei coloane sînt: *blazul de distilare* (*fierbătorul*), *coloana propriu-zisă, condensatorul și răcitorul de distilat.* Contactul dintre vapori și lichid într-o coloană cu talere se realizează discontinuu pe talerele coloanei (table perforate sau elemente de construcție specială ca, profile diferite, clopote, supape etc.), prin barbotarea vaporilor prin stratul de lichid care traversează talerele coloanei; după ce traversează talerele, lichidul se scurge de pe un taler pe altul, prin conducte deversoare.

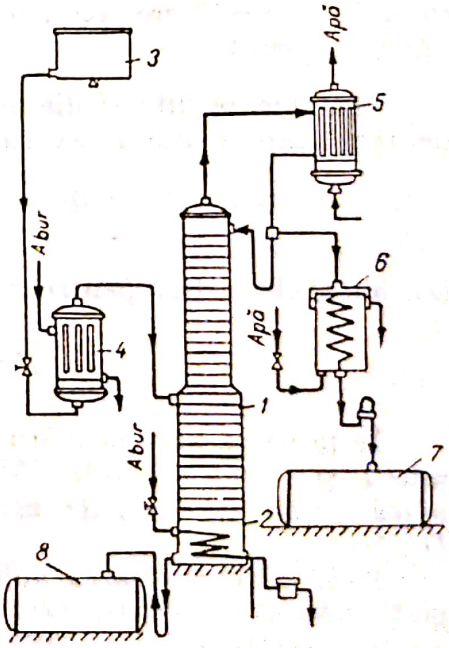


Fig. 164. Instalația continuă de rectificare:

1 — coloană de rectificare cu talere; 2 — fierbător; 3 — rezervor de nivel; 4 — preîncălzitor; 5 — condensator; 6 — răcitor; 7 — rezervor pentru distilat; 8 — rezervor pentru reziduu

Rectificarea continuă a amestecurilor binare. Pentru dimensionarea tehnologică a unei coloane de rectificare cu funcționare continuă este necesar să se determine, cunoscînd debitul amestecului de separat și compoziția distilatului și reziduului, *debitul produselor* (distilatul și reziduul), *numărul talerelor* necesare pentru realizarea separării, *înălțimea și secțiunea coloanei, debitul aburului* de încălzire a blazului, *debitul apei de răcire* în condensator și răcitorul de distilat.

Pentru determinarea numărului de talere necesare separării dorite într-o coloană

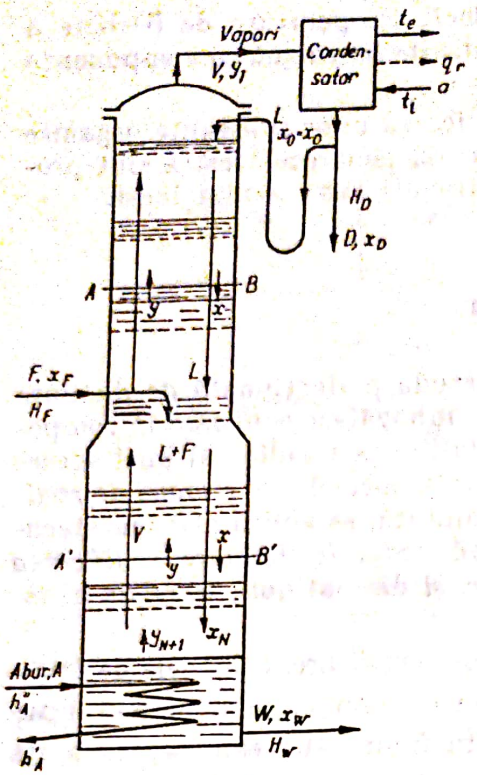


Fig. 165. Schiţa circulaţiei fazelor şi variaţiei concentraţiilor într-o coloană de rectificare continuă cu talere.

se folosesc metode grafice şi metode analitice. Majoritatea metodelor se referă la noţiunea de *taler teoretic*. Prin taler teoretic se înţelege talerul (unitatea de contact) pe care, în urma contactului dintre vapori şi lichid, compoziţiile celor două faze la părăsirea talerului se găsesc în stare de echilibru. Deoarece talerele reale nu asigură atingerea condiţiilor, de echilibru, numărul real de talere se determină ţinînd seama de eficienţa sau randamentul coloanei.

Determinarea numărului de talere teoretice. Prin rectificare, amestecul iniţial notat cu F şi avînd compoziţia x_F (în componenta volatilă) este separat în două fracţiuni: distilatul D avînd compoziţia x_D şi reziduul W, avînd compoziţia x_w. Amestecul de separat se introduce pe un anumit taler, al cărui lichid are compoziţia egală cu compoziţia de alimentare x_F. În acest mod coloana se împarte în două părţi (zone): partea (zona) de concentrare deasupra talerului de alimentare, numit astfel deoarece în această zonă lichidul de pe talere, către vîrful coloanei, se concentrează în componenta volatilă şi partea (zona) de epuizare, în care lichidul care se scurge către blazul coloanei săräceşte în componenta volatilă.

Aşa cum rezultă şi din schiţa din figura 165, bilanţul global al coloanei de rectificare poate fi exprimat prin relaţia:

$$F = W + D, \tag{155}$$

iar bilanţul parţial pentru componenta volatilă, prin relaţia:

$$F \cdot x_F = W \cdot x_w + D \cdot x_D. \tag{156}$$

În practica dimensionării coloanelor de rectificare se obişnuieşte ca mărimile F şi W din ecuaţiile (155) şi (156) să se raporteze la un mol de distilat, adică reprezintă debitele necesare pentru obţinerea unui mol de distilat, $D=1$.

Pentru determinarea numărului teoretic de talere se utilizează metoda grafică Mc Cabe-Thiele. Această metodă este valabilă atunci cînd sînt îndeplinite următoarele condiţii:

— căldurile de vaporizare ale ambelor componente sînt egale, astfel încît debitele vaporilor V şi lichidului L sînt constante în tot lungul coloanei; amestecul iniţial de separat se introduce în coloană la temperatura de fierbere corespunzătoare talerului de alimentare; în coloană nu se consumă căldură pentru încălzirea amestecului de separare;

Scanned with OKEN Scanner

— prin condensare, compoziţia vaporilor şi a lichidului rămîne neschimbată, adică în conformitate cu notaţiile din figura 165, compoziţia vaporilor care ies din coloană y_1 este egală cu compoziţia distilatului x_D şi cu compoziţia lichidului de reflux x_0, $y_1=x_0=x_D$;

— prin vaporizarea lichidului din blaz compoziţia acestuia rămîne neschimbată, adică, conform notaţiilor din figura 165, $y_{N+1}=x_N=x_w$.

În vederea determinării numărului de talere, se urmăreşte mai întîi găsirea ecuaţiei liniilor de operaţie pentru cele două zone ale coloanei de rectificare. În acest scop se consideră, undeva în lungul coloanei, o secţiune oarecare pentru care se întocmeşte bilanţul de materiale pentru componenta volatilă. Fie această secţiune AB în zona de concentrare a coloanei, în care concentraţiile celor două faze sînt y şi x, aşa cum rezultă din figura 165. În acest mod, pentru porţiunea de coloană situată deasupra secţiunii considerate, se poate întocmi următorul bilanţ ai componentei volatile:

$$V \cdot y + L \cdot x_0 = V \cdot y_1 + Lx, \tag{157}$$

sau

$$y - y_1 = \frac{L}{V}(x - x_0). \tag{158}$$

Ţinînd seama că refluxul L este raportat la 1 mol de distilat $D=1$, rezultă relaţia:

$$V = L + 1, \tag{159}$$

adică pentru obţinerea unui mol de distilat prin coloană trece un debit de vapori din a căror condensare rezultă refluxul L şi distilatul $D=1$.

Pentru zona de concentrare, aşa cum s-a stabilit, între compoziţiile y_1, x_0 şi x_D există relaţia: $y_1=x_0=x_D$. Ţinînd seama de aceasta şi de relaţia (159), ecuaţia 158 se poate scrie sub forma:

$$\boxed{y - x_D = \frac{L}{L+1}(x - x_D),} \tag{160}$$

care reprezintă ecuaţia dreptei de concentrare (dreapta de operaţie pentru zona de concentrare a coloanei). Din ecuaţia (160) rezultă că linia (dreapta) de concentrare are panta $L/(L+1)$ şi trece prin punctul D de coordonate x_D, x_D situat pe diagonala diagramei de echilibru (fig. 166); ordonata sa la origine y_c se obţine din condiţia $x=0$, rezultînd:

$$\boxed{y_c = \frac{xD}{L+1}.} \tag{161}$$

Scanned with OKEN Scanner

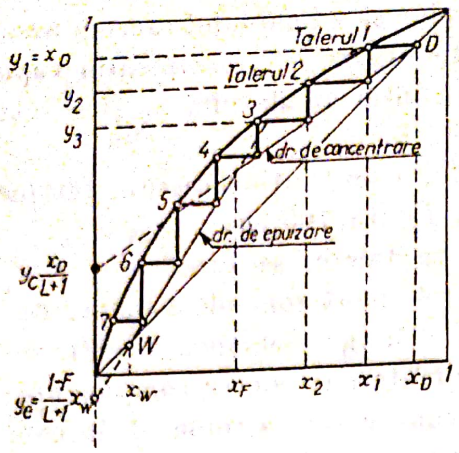


Fig. 166. Determinarea numărului de talere teoretice prin metoda grafică Mc Cabe Thiele.

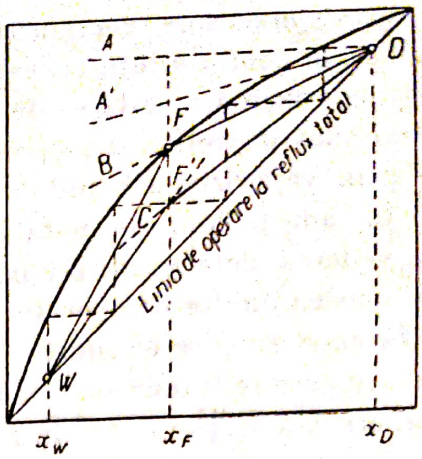


Fig. 167. Determinarea refluxului minim.

Ecuaţia dreptei de epuizare se obţine în mod analog. Întocmind bilanţul de materiale pentru porţiunea situată între secţiunea $A'B'$ şi ultimul taler N din zona de epuizare, ţinînd seama că la lichidul de reflux L se adaugă şi amestecul iniţial F, se obţine ecuaţia:

$$y_{N+1}-y=\frac{L+F}{V}(x_N-x), \tag{162}$$

punînd condiţia $y_{N+1}=x_N=x_W$, ia forma:

$$\boxed{y-x_W=\frac{L+F}{L+1}(x-x_W).} \tag{163}$$

Relaţia (163) reprezintă ecuaţia dreptei de epuizare care are următoarele proprietăţi: trece prin punctul W de coordonate x_W, x_W situat pe diagonala diagramei de echilibru, are panta $(L+F)/(L+1)$ şi ordonata la origine y_e dată de expresia:

$$\boxed{y_e=\frac{1-F}{L+1}x_W.} \tag{164}$$

Se poate demonstra că cele două drepte de operare se intersectează într-un punct a cărui abscisă este egală cu compoziţia amestecului de separat; ordonata punctului de intersecţie este funcţie de mărimea refluxului.

Pentru determinarea numărului de talere teoretice prin metoda grafică se procedează în modul următor:

— se trasează curba de echilibru prin reprezentarea în diagrama de echilibru a datelor experimentale de echilibru pentru amestecul binar respectiv sau a datelor calculate cu ecuaţiile (148) şi (149); dacă se cunoaşte valoarea, volatilităţii relative α se poate utiliza relaţia lui Fenske (151);

— pe axa absciselor se fixează punctele x_W, x_F, x_D reprezentînd fracţiile molare ale reziduului, amestecului de separat şi distilatului, cunoscute din condiţiile de funcţionare cerute;

— se fixează, pe diagonala diagramei, punctele W şi D cu ajutorul absciselor x_W şi x_D;

— se trasează, ţinînd seama de proprietăţile lor, dreptele de concentrare şi de epuizare; aceste două drepte sînt concurente cu verticala abscisei x_F;

— se trasează linia în trepte între curba de echilibru şi dreptele de operare, reprezentînd variaţia concentraţiilor celor două faze pe fiecare taler teoretic;

— numărul talerelor teoretice se determină numărînd porţiunile orizontale ale liniei în trepte.

Pentru exemplul considerat în figura 166 separarea necesită şapte talere teoretice, dintre care patru în zona de concentrare şi trei în zona de epuizare; talerele coloanelor se numerotează începînd de sus (din vîrful coloanei) în jos.

Determinarea refluxului minim şi a refluxului optim. Refluxul unei coloane de rectificare poate varia între două valori extreme: reflux minim şi reflux total. Acest lucru se poate constata mai uşor din figura 167. Dreapta AD corespunde refluxului zero;

Dreapta $A'D$ corespunde unui reflux oarecare, însă valoarea acestuia este prea mică şi numărul de talere nu poate fi determinat.

Dreapta BD intersectează curba de echilibru chiar în punctul F, corespunzător concentraţiei de echilibru pentru amestecul de alimentare; în acest caz rectificarea poate avea loc, însă numărul de talere teoretice necesare este egal cu infinit (către punctul F linia în trepte dă un număr infinit de orizontale). Refluxul posibil de lucru corespunde unor înclinări ale dreptelor de operare cuprinse între valori care să ducă concurenţa lor în punctul F (reflux minim) sau confundarea lor cu diagonala (reflux total). Coloana care funcţionează la reflux total nu poate produce nimic, tot lichidul condensat se refluxează în coloană; coloana lucrează cu un număr minim de talere, patru pentru exemplul din figura 167. Valoarea refluxului minim L_m se determină scriind ecuaţia (160) pentru punctele $D(x_D, y_D)$ şi $F(y_F, x_F)$, obţinîndu-se după explicitarea refluxului minim L_m relaţia de calcul:

$$L_m = \frac{x_D - y_F}{y_F - x_F}. \tag{165}$$

Valoarea refluxului de lucru se calculează din relaţia:

$$L = C \cdot L_m, \tag{166}$$

în care C, numit uneori indice de reflux, are valoare supraunitară. Cu cît refluxul de lucru este mai mare, cu atît separarea realizată este mai bună şi numărul de talere teoretice mai mic. Nu este recomandabil însă să se mărească prea mult refluxul, deoarece aceasta duce la un consum mare de căldură pentru vaporizarea vaporilor $V = L + 1$ şi de apă de răcire pentru condensarea refluxului în condensator; pe de altă parte, odată cu creşterea refluxului creşte şi secţiunea coloanei, deoarece, aşa cum s-a văzut, creşte debitul vaporilor.

Scanned with OKEN Scanner

Bilanțul termic al coloanelor de rectificare. Bilanțul termic pentru o coloană continuă de rectificare se întocmește egalînd căldurile intrate, aduse cu amestecul de separat F, cu aburul de încălzire A și cele ieșite cu distilatul $D=1$, cu apa de răcire în condensator, cu reziduul din blaz. În figura 165 sub simbolurile materialelor care intră și ies din coloană s-au notat și entalpiile corespunzătoare, notate cu H dacă se referă la mol și cu h dacă se referă la kg. Ținînd seama de aceste considerente (fără considerarea pierderilor de căldură în exterior), ecuația bilanțului termic se poate scrie sub forma:

$$A \cdot h''_A + F \cdot H_F = 1 \cdot H_D + W \cdot H_F + q_r + A \cdot h'_A. \qquad (167)$$

Dacă în ecuația (167) se introduce relația $F=1+W$, dedusă din bilanțul global al coloanei, și se înlocuiește căldura q_r luată de apa de răcire din condensator $q_r=V_{rD}=(1+L)r_D$, r_D fiind căldura de condensare a distilatului, în urma unor regrupări se obține:

$$A(h''_A-h'_A)=(1+L)r_D+W(H_W-H_F)-(H_F-H_D). \qquad (168)$$

Ultimii doi membri ai părții a doua a ecuației (168) se pot neglija deoarece reprezintă diferențe între entalpiile unor lichide la temperaturi destul de apropiate. Înlocuind diferența $(h-h)$ prin căldura de vaporizare a aburului r_A, ecuația bilanțului termic ia forma simplificată:

$$\boxed{A=(1+L)\frac{r_D}{r_A},} \qquad (169)$$

care permite calculul aburului necesar pentru obținerea unui mol de distilat.

Debitul apei de răcire a, considerînd că aceasta se încălzește în condensator de la temperatura de intrare t_i la temperatura de ieșire t_e, se poate calcula din relația:

$$\boxed{a=(1+L)\frac{rD}{c_a(t_e-t_i)}=A\frac{rA}{c_a(t_e-t_i)},} \qquad (170)$$

în care c_a este căldura specifică a apei, în J/kg · grd.

Rectificarea discontinuă a amestecurilor binare. Acest mod de distilare utilizează același echipament ca și rectificarea continuă, blazul, coloana propriu-zisă și condensatorul. Funcționarea coloanei este însă diferită: în rectificarea discontinuă, lichidul de separat este încărcat de la început în blaz și începe să se încălzească. Coloana este adusă mai întîi în regim staționar la reflux total (fără a produce distilat) și abia după aceea începe să se colecteze distilatul; mai departe operația decurge în regim nestaționar. Coloana lucrează în aceste condiții numai ca o coloană de concentrare, epuizarea lichidului făcîndu-se în blazul coloanei.

Rectificarea discontinuă se poate efectua în două variante: *rectificarea cu reflux constant și rectificarea cu concentrație constantă a distilatului.*

Rectificarea discontinuă cu reflux constant produce un distilat a cărui concentrație în componenta volatilă scade continuu în timpul desfășurării operației. Cînd distilatul a atins concentrația limită admisă, operația se oprește, reziduul este scos din blaz și operația reîncepe.

Scanned with OKEN Scanner

Rectificarea cu concentraţie constantă a distilatului se realizează prin mărirea continuă a refluxului L; în acest mod, cu acelaşi număr de talere, concentraţia distilantului se menţine constantă, deşi concentraţia lichidului din blaz scade continuu. Operaţia se opreşte atunci cînd valoarea mare a refluxului L face neeconomică continuarea acesteia: se opreşte instalaţia, se evacuează blazul coloanei şi operaţia se poate relua.

d. Coloane de rectificare

Coloanele de rectificare, utilizate în industria chimică şi petrochimică, se pot clasifica în trei categorii mari: *coloane cu talere, coloane cu umplutură* şi *coloane de construcţie specială.*

1) Coloane cu talere

În aceste coloane, contactul dintre vapori şi lichid se realizează prin barbotarea vaporilor sub formă de bule sau jeturi prin stratul de lichid care traversează talerul longitudinal. Pentru distribuţia vaporilor sub formă de bule sau jeturi prin straturi de lichid se utilizează diferite variante constructive pentru talere. Din acest punct de vedere, talerele se pot împărţi în următoarele tipuri principale: *talere cu clopote, talere sită* (din plăci perforate) şi *talere de construcţie speciale* (profilate, supape etc.).

Coloane cu talere cu clopote. Talerele cu clopote sînt formate dintr-o tablă metalică prevăzută cu deschideri în care se fixează conducte acoperite cu clopote. În figura 168 se prezintă o secţiune printr-o coloană cu talere cu clopote. Barbotarea vaporilor prin stratul de lichid se datoreşte construcţiei şi fixării clopotelor. Vaporii intră prin conductele scurte (gîturile clopotelor), străbat spaţiul inelar dintre gît şi clopot, fiind apoi divizaţi în bule datorită trecerii lor prin ferestrele (fantele) sau dinţii clopotului şi sub această formă, barbotează prin stratul de lichid. Refluxul (lichidul) curge de la talerul superior prin conducta deversoare, parcurge talerul trecînd printre şi peste clopote, deversează peste pragul de deversare, care stabileşte grosimea stratului de lichid pe taler, şi curge prin conducta deversoare pe talerul imediat inferior. Pentru a asigura închiderea hidraulică necesară împiedicării trecerii vaporilor prin conductele deversoare, acestea se afundă în lichidul de pe talerul inferior. Clopotele se construiesc sub mai multe forme; mai răspîndite sînt construcţiile din

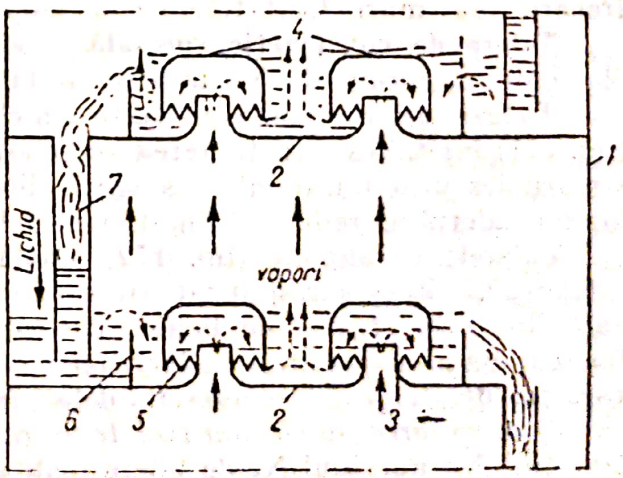


Fig. 168. Schema de principiu a unei coloane de rectificare cu talere cu clopote: 1 — peretele coloanei; 2 — talere; 3 — gîtul clopotului; 4 — clopot; 5 — dinţii clopotului; 6 — prag de deversare; 7 — conducta de deversare.

Scanned with OKEN Scanner

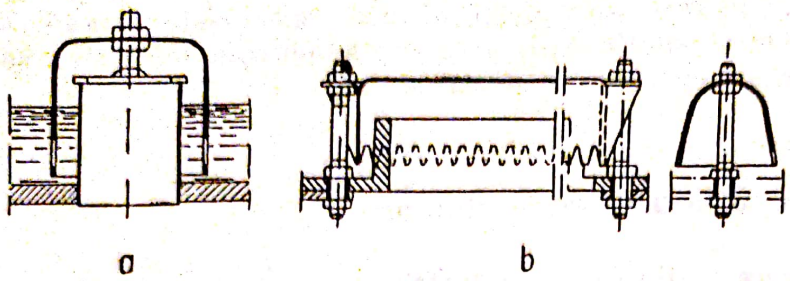


Fig. 169. Tipuri de clopote:
a — clopot rotund; *b* — clopot tunel.

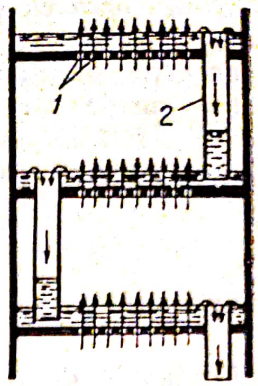


Fig. 170. Schema de principiu a unei coloane de rectificare cu talere sită:
1 — talere cu orificii;
2 — conductă deversoare.

figura 169 în care se prezintă un clopot rotund cu fante şi un clopot tunel (dreptunghiular) cu dinţi.

Coloane cu talere sită. Talerele acestor coloane sînt nişte table perforate prin orificiile cărora trec vaporii, barbotînd apoi prin stratul de lichid; lichidul circulă în lungul talerului ca şi la talerele cu clopote. Construcţia şi funcţionarea unei coloane cu talere sită rezultă din figura 170. În regimul de lucru normal al coloanei, lichidul nu curge prin orificiile talerului, fiind menţinut de presiunea gazului. Coloanele cu talere sită se caracterizează prin simplitatea construcţiei şi prin eficienţă ridicată. Principalul neajuns se referă la sensibilitatea faţă de variaţia debitului de lichid şi vapori, aceste coloane lucrînd eficient numai între anumite limite ale vitezei vaporilor în coloană; talerele sită produc, la aceleaşi viteze ale vaporilor, pierderi de presiune, prin frecare, mai mari decît talerele cu clopote.

Talere de construcţie specială. Asemenea construcţii sînt talerele din elemente în formă de S (uniflux) şi talerele cu supape (cu capac flotant).

Talerele uniflux sînt construite din elemente în formă de S, astfel dispuse (fig. 171) încît, deşi funcţionarea lor se aseamănă cu cea a talerelor cu clopote, vaporii ies prin fante într-o singură direcţie, ajutînd curgerea lichidului în lungul talerului, reducînd înălţimea lichidului deasupra pragului deversor.

Talerele cu supape (fig. 172) sînt formate din nişte elemente a căror ridicare, la viteza corespunzătoare a vaporilor, permite trecerea şi barbotarea vaporilor prin stratul de lichid; datorită acestui principiu de funcţionare, talerele din această categorie lucrează cu eficienţă foarte mare, independent de variaţia debitelor (vitezelor) fluidelor în contact.

Determinarea numărului real de talere. Cînd se cunoaşte numărul de talere teoretice N_t, numărul N_r de talere reale se determină împărţind acest număr la eficacitatea medie E (sau randamentul mediu) a talerului:

$$N_r = N_t/E. \qquad (171)$$

Eficacitatea talerelor este mai mică decît unitatea, deoarece talerele reale nu pot asigura contactul ideal între cele două faze pentru atingerea condiţiilor

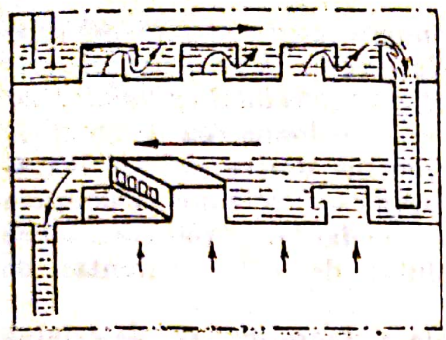


Fig. 171. Schema unui taler din elemente în formă de S (uniflux).

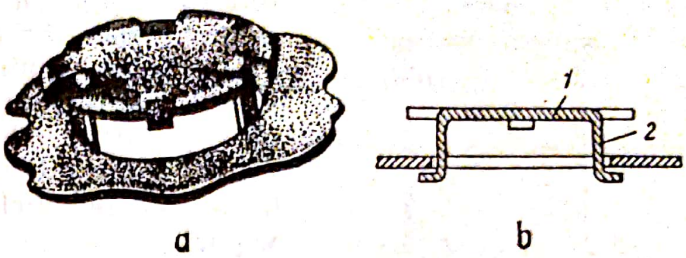


Fig. 172. Element principal al talerelor cu supape:
a — vedere generală; *b* — secţiune; *1* — discul supapei; *2* — tije de ghidare.

de echilibru. Eficacitatea talerului depinde atît de construcţia acestuia cît şi de parametrii fizici ai vaporilor şi lichidului.

Pentru buna funcţionare a unei coloane cu talere este necesar ca viteza vaporilor să nu depăşească o anumită limită (maximă şi minimă), iar distanţa dintre talere să asigure închiderea hidraulică necesară (prin coloana de lichid) care se menţine în conductele deversoare).

Deşi viteza vaporilor depinde de tipul constructiv al talerului se consideră că valorile normale de lucru pentru viteza vaporilor în coloană, w_0, sînt de ordinul $w_0=0{,}4-0{,}8$ m/s. În ceea ce priveşte distanţa dintre talere H, pentru coloane adăpostite (montate în clădiri) se consideră valorile minime (funcţie de viteza gazului) necesare pentru asigurarea închiderii hidraulice, $H=0{,}150-0{,}250$ m, în timp ce pentru coloanele neadăpostite (montate în aer liber) se are în vedere şi posibilitatea accesului, pentru reparaţii la talere, astfel încît se poate considera $H=0{,}250-0{,}500$ m.

2) Coloane cu umplutură

În aceste coloane, contactul dintre vapori şi lichid se realizează pe suprafaţa corpurilor de umplere — umplutură — dispuse în toată secţiunea coloanei, pe toată înălţimea acesteia. Suprafaţa specifică mare a umpluturii îmbunătăţeşte sensibil contactul dintre cele două fluide care circulă în contracurent în lungul coloanei. Ca umplutură pot fi utilizate toate corpurile de umplere. În coloanele industriale se utilizează mai des umplutură ceramică constituită din inele Raschig şi şei Berl. În figura 173 este reprezentată o coloană de rectificare cu umplutură. Introducerea refluxului în vîrful coloanei şi alimentarea coloanei cu amestecul lichid de separat se realizează prin intermediul unor dispozitive care asigură repartizarea uniformă a lichidului în umplutură, pe întreaga secţiune a coloanei; pentru susţinerea umpluturii în coloană se utilizează grătare de susţinere.

Avantajele principale ale coloanelor cu umplutură sînt următoarele: construcţia simplă, pierderile de presiune mică, posibilitatea de construire din materiale rezistente la coroziune (umplutură ceramică), eficienţă mare (putere mare de separare). Coloanele cu umplutură se utilizează îndeosebi pentru rectificări discontinue şi pentru rectificarea continuă sub vid, sau pentru separarea amestecurilor corosive.

Scanned with OKEN Scanner

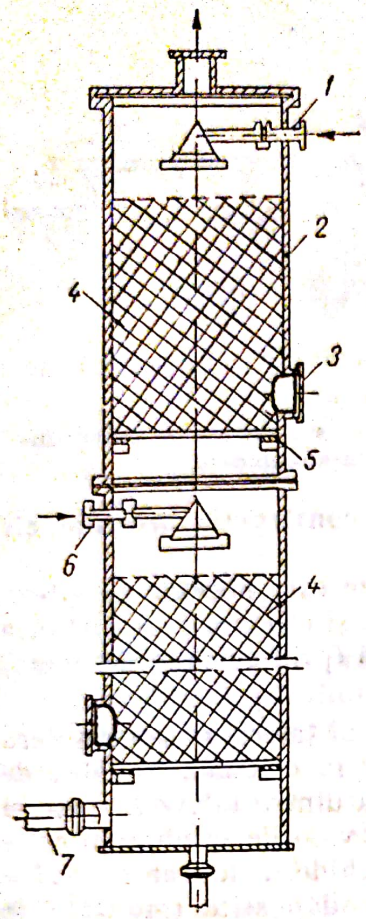


Fig. 173. Coloană de rectificare cu umplutură:

1 — dispozitiv pentru repartizarea refluxului; *2* — corpul coloanei; *3* — gură de vizitare; *4* — umplutură; *5* — grătar de susținere a umpluturii; *6* — dispozitiv pentru repartizarea amestecului de separat; *7* — conducte de legătură cu fierbător exterior.

Pentru dimensionarea unei coloane de distilare cu umplutură este necesar să se determine aria secțiunii coloanei și înălțimea stratului cu umplutură.

Aria secțiunii unei coloane cu umplutură se determină din raportul dintre debitul vaporilor și viteza admisibilă în coloană. Depășirea vitezei admisibile duce la înecarea coloanei, adică la antrenarea lichidului de către curentul de vapori.

Numărul de talere teoretice se determină aplicînd aceleași metode ca și la coloanele cu talere. Înălțimea stratului de umplutură I se determină înmulțind numărul talerelor teoretice N_t cu înălțimea unui strat de umplutură avînd același efect ca un taler teoretic; această înălțime a stratului se numește *înălțime echivalentă a unui taler teoretic* și se notează cu I.E.T.T.

$$I = N_t \cdot (\text{I.E.T.T.}) \qquad (172)$$

Înălțimea echivalentă este o mărime care se determină experimental pentru fiecare umplutură, depinzînd în același timp și de debitele și parametrii fizici ai fluidelor în contact.

Suprafața umpluturii S se poate determina din ecuațiile generale ale transferului de masă transcrise pentru concentrații (y, x) și debite caracteristice rectificării. Astfel, pentru faza de vapori se poate scrie sub forma:

$$S = \frac{n_A}{K_g(\Delta y)_m} = \frac{G_v(y_D - y_w)}{K_g(\Delta y)_m} \qquad (173)$$

Dacă se cunoaște suprafața S a umpluturii (suprafața efectivă a umpluturii pe care are loc contactul între cele două fluide), înălțimea stratului de umplutură I se poate determina din relația

$$I = \frac{S}{A \cdot \sigma}, \qquad (174)$$

în care:

A este aria secțiunii coloanei, în m^2;

σ — suprafața specifică a umpluturii, în m^2/m^3.

Pentru dimensionarea coloanelor de rectificare este necesar să se calculeze pierderea de presiune la trecerea vaporilor și lichidului prin talerele sau umplutura coloanei. Aceste calcule se fac cu ajutorul relațiilor stabilite la curgerea fluidelor.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicații

Exercițiul 1

Să se calculeze compoziția fazei de vapori care se găsește în echilibru la temperatura de 60°C, cu un amestec benzen-toluen conținînd 40% mol benzen și 60% mol toluen. Se dau presiunile de vapori la 60°C: presiunea vaporilor de benzen $P_1=385$ mm Hg; presiunea vaporilor de toluen $P_2=140$ mm Hg.

Rezolvarea

Compoziția de echilibru a vaporilor se determină cu ajutorul relațiilor (145) și (146) valabile pentru amestecuri ideale care urmează legea lui Raoult.

Presiunile parțiale se calculează cu relațiile (143) și (144) de definiție a legii lui Raoult. Înlocuind se obține:

— presiunea parțială a benzenului $p_1=385\times0,4=154$ mm Hg;

— presiunea parțială a toluenului $p_2=140\times0,6=84$ mm Hg;

— presiunea totală p, deasupra amestecului, se obține însumînd: $p=p_1+p_2=154+84=238$ mm Hg.

Înlocuind valorile calculate în relațiile (145) și (146), se determină următoarea compoziție de echilibru a vaporilor: pentru benzen $y_1=0,648$; pentru toluen $y_2=0,352$.

Rezultă că vaporii în echilibru conțin 64,8% mol benzen și 35,2% mol toluen.

Exercițiul 2

Se cere să se calculeze compoziția amestecului benzen-toluen care fierbe la 90°C, sub presiunea totală $p=760$ mm Hg. Se dau presiunile de vapori la 90°C: pentru benzen $P_1=1\,013$ mm Hg; pentru toluen $P_2=408$ mm Hg.

Rezolvare

Se utilizează ecuația (147); înlocuind pentru componenta ușoară, benzenul, se obține, după rezolvarea ecuației, fracția molară $x_1=0,583$, iar pentru toluen: $x_2=0,417$.

Deci la 90°C, sub o presiune de 760 torr, va fierbe amestecul benzen-toluen, avînd compoziția de 58,3% mol benzen și 41,7% toluen.

Exercițiul 3

Să se construiască diagrama de fierbere și diagrama de echilibru pentru amestecul benzen-toluen la presiunea totală absolută, $p=760$ torr. Valoarea presiunilor de vapori ale celor două componente sînt date în coloanele (1) și (2) din tabela 5.

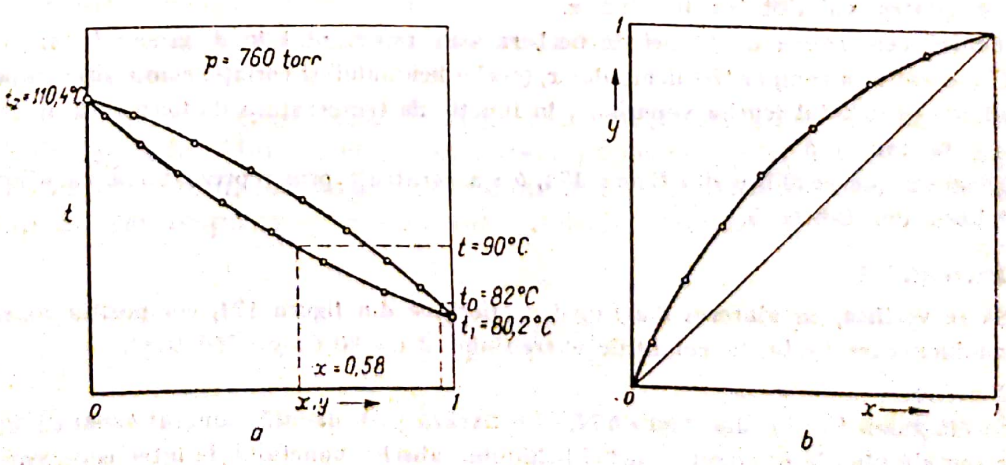


Fig. 174. Încercarea talerelor cu clopot la barbotare (a) și diagrama de echilibru a amestecului benzen-toluen (b).

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 5

Temperatura t, în °C	Presiunile de vapori, în torr		Compoziția fazelor în echilibru		Volatilitatea relativă $\alpha = P_1/P_2$
	Benzenul P_1	Toluenul P_2	În lichid: $x_1 = \frac{p-P_2}{P_1-P_2}$	În vapori: $y_1 = \frac{P_1}{p} x_1$	
0	1	2	3	4	5
80,2	760	300	$\frac{760-300}{760-300}=1$	$\frac{760 \cdot 1}{760}=1$	2,54
84	852	333	$\frac{760-333}{852-333}=0{,}823$	$\frac{852 \cdot 0{,}823}{760}=0{,}922$	2,56
88	957	380	$\frac{760-380}{957-380}=0{,}659$	$\frac{957 \cdot 0{,}659}{760}=0{,}830$	2,52
92	1 078	432	$\frac{760-432}{1\,078-432}=0{,}508$	$\frac{1\,078 \cdot 0{,}508}{760}=0{,}720$	2,49
96	1 204	493	$\frac{760-493}{1\,204-493}=0{,}376$	$\frac{1\,204 \cdot 0{,}376}{760}=0{,}596$	2,47
100	1 344	559	$\frac{760-559}{1\,344-559}=0{,}256$	$\frac{1\,344 \cdot 0{,}256}{760}=0{,}453$	2,40
104	1 495	626	$\frac{760-626}{1\,495-626}=0{,}155$	$\frac{1\,495 \cdot 0{,}155}{760}=0{,}304$	2,38
108	1 659	705	$\frac{760-705}{1\,659-705}=0{,}058$	$\frac{1\,659 \cdot 0{,}058}{760}=0{,}128$	2,35
110,4	1 748	760	$\frac{760-760}{1\,748-760}=0$	$\frac{1\,748 \cdot 0}{760}=0$	2,30

Rezolvare

Se calculează mai întîi compozițiile la echilibru x_1 și y_1 pentru componenta ușoară, benzenul, cu ajutorul ecuațiilor (147) și (148). Rezultatele calculelor sînt cuprinse în tabela 5, precum și calculele pentru volatilitatea relativă α.

Pentru construirea diagramei de fierbere s-au reprezentat în diagrama t, (x, y) din figura 174, *a* variația compoziției lichidului x_1 (curba lichidului) și variația compoziției vaporilor y_1 în echilibru cu lichidul (curba vaporilor), în funcție de temperatura de fierbere a amestecului, calculate în tabela 5.

Diagrama de echilibru din figura 174, *b* s-a construit prin reprezentarea valorilor y și x de echilibru din tabela 5.

Exercițiul 4

Să se verifice, cu ajutorul diagramei de fierbere din figura 174, compoziția amestecului benzen-toluen care fierbe în condițiile exercițiului 2 ($t=90$°C; $p=760$ torr).

Rezolvare

În diagrama t (x, y) din figura 174, *a* se fixează pe ordonată punctul $t=90$°C; se duce o linie orizontală pînă la intersecția curbei lichidului; abscisa punctului de intersecție corespunde compoziției de fierbere a amestecului. Din diagramă rezultă valoarea $x_1=0{,}58$, foarte apropiată de cea determinată prin calcul în exercițiul 2.

Scanned with OKEN Scanner

Verificarea cunoştinţelor

1. Enunţaţi legea lui Raoult.
2. Ce sînt amestecurile azeotropice? Exemple.
3. Faceţi o comparaţie între distilarea simplă şi distilarea de echilibru.
4. Ce este refluxul într-o coloană de rectificare?
5. Definiţi refluxul minim şi refluxul optim.
6. Prezentaţi modul de lucru la determinarea numărului de talere prin metoda grafică a amestecurilor binare.
7. Faceţi o comparaţie între distilarea azeotropică şi distilarea extractivă.
8. Prezentaţi constructiv şi funcţional diferite tipuri de talere.
9. Cum se determină numărul real de talere?
10. Care sînt avantajele coloanelor cu umplutură faţă de coloanele cu taler?

3. ABSORBŢIA

Prin **absorbţie** *se înţelege dizolvarea fizică a gazelor sau a vaporilor într-o substanţă lichidă; procesul invers, de trecere în fază gazoasă a unui gaz dizolvat într-un lichid se numeşte* **desorbţie.** *Cînd dizolvarea gazului este urmată de o reacţie chimică se foloseşte termenul de* **chemosorbţie.**

Absorbţia, ca operaţie unitară, serveşte la separarea sau purificarea amestecurilor de gaze prin dizolvarea uneia sau mai multor componente într-un lichid potrivit, numit **absorbant.**

Absorbţia este urmată de desorbţie în toate cazurile cînd componentele adsorbite sînt utile, iar utilizarea lor în continuare necesită trecerea, din nou, în fază gazoasă.

a. Echilibrul gaz-lichid

Solubilitatea gazelor în lichide depinde de natura gazului şi a lichidului absorbant, precum şi de temperatura şi presiunea la care se găseşte sistemul gaz-lichid considerat.

Într-un sistem gaz-lichid, relaţia între concentraţiile de echilibru este redată de legea lui Henry, conform căreia presiunea parţială de echilibru p_n a unei componente n, la temperatura constantă, este funcţie de fracţia molară a componentei respective, x_n, în faza lichidă, adică:

$$\boxed{p_n = H_n x_n,} \qquad (175)$$

în care H_n este constanta lui Henry pentru componenta n — avînd dimensiunile unei presiuni.

Constanta lui Henry are valori mari pentru gazele greu solubile şi valori mici pentru gazele foarte solubile. Ca şi în cazul echilibrului vapori-lichid,

Scanned with OKEN Scanner

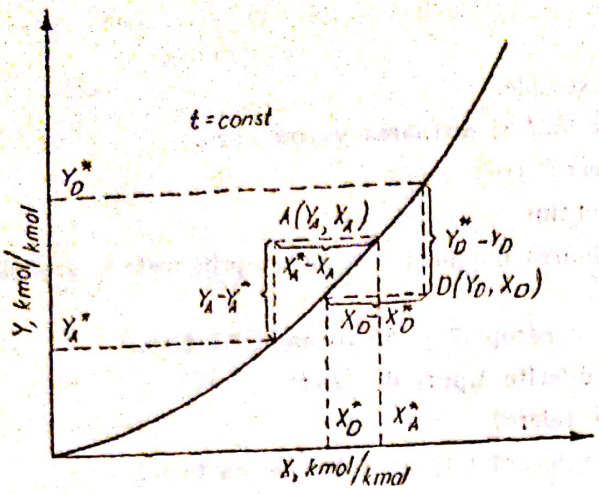


Fig. 175. Curba de echilibru pentru sistemul gaz-lichid.

fracţia molară în fază gazoasă, y_n, se determină în funcţie de presiunea totală p şi de presiunea parţială a componentei n, cu relaţia

$$y_n = \frac{p_n}{p} = \frac{H_n}{p} x_n = m_n x_n, \qquad (176)$$

în care $m_n = H_n/p$ este o constantă adimensională.

Dacă se lucrează cu rapoarte molare Y, X, ecuaţia (176) ia forma

$$Y = \frac{mX}{1+(1-m)X}. \qquad (177)$$

Legea lui Henry este aplicabilă numai pentru sisteme ideale la presiuni şi concentraţii nu prea mari, în special pentru gazele care nu au o solubilitate prea mare. În aceste cazuri ecuaţiile (175)—(177) servesc la construirea diagramelor de echilibru necesare în dimensionarea coloanelor de absorbţie. Pentru sisteme care nu ascultă de legea lui Henry, trasarea liniilor de echilibru se face cu ajutorul datelor experimentale, care se găsesc în literatura de specialitate.

Diagrama de echilibru. Ca şi în cazul coloanelor de rectificare, diagrama de echilibru serveşte la calculul coloanelor în care are loc operaţia respectivă. Spre deosebire de rectificare, pentru absorbţie se lucrează în rapoarte molare Y, X, exprimînd pentru faza gazoasă Y numărul de kmoli din componenta care se absoarbe raportat la 1 kmol de gaz inert (înţelegînd prin inert gazul care nu se absoarbe), iar pentru faza lichidă X numărul de kmoli de gaz dizolvat raportat la 1 kmol de lichid absorbant (nu de soluţie). De aceea, în cazul absorţiei se consideră, pentru faza gazoasă, numai debitul molar al gazului inert G, iar pentru faza lichidă, numai debitul molar al lichidului absorbant L, ambele debite fiind constante în lungul coloanei.

În figura 175 este reprezentată curba de echilibru pentru un sistem gaz-lichid oarecare la temperatura t=const. Pe diagramă s-au figurat punctul $A(Y_A, X_A)$ situat deasupra curbei de echilibru şi punctul $D(Y_D, X_D)$ situat dedesubtul curbei de echilibru. Pentru punctul A concentraţia gazului Y_A este mai mare decît concentraţia de echilibru Y_A^* dedusă din curba de echilibru, ceea ce impune absorbţia gazului pînă la atingerea concentraţiei de echilibru corespunzătoare; în mod analog, pentru faza lichidă concentraţia de echilibru X_A^* este mai mare decît concentraţia X_A şi deci operaţia decurge în sensul egalizării acestor concentraţii, adică are loc absorbţia gazului. Se observă cu uşurinţă că poziţia punctului D corespunde unei situaţii în care valorile concentraţiilor componentei solubile în cele două faze, Y_D şi X_D, creează o forţă motrice care descreşte în sensul de la lichid la gaz, adică are loc desorbţia gazului din lichidul absorbant; această situaţie este reprezentată pe figură, conform căreia $Y_D < Y_D^*$ şi $X_D > X_D^*$, ceea ce duce, pentru atingerea echilibrului, la creşterea concentraţiei Y_D în gaz şi la scăderea concentraţiei

Scanned with OKEN Scanner

X_D în lichid, adică la desorbție. Din aceste considerații se poate deduce că poziția liniilor de operație (care reprezintă concentrațiile de lucru în lungul aparatului în care se desfășoară operația) va fi diferită în cazul absorbției și desorbției; pentru absorbție linia de operație se va situa deasupra liniei de echilibru, iar pentru desorbție, sub linia de echilibru.

b. Calculul coloanelor de absorbție

Deși se cunosc multe tipuri de aparate, cele mai des aplicate pentru realizarea operațiilor de absorbție și desorbție sînt aparate tip coloană, în general coloane cu talere și cu umplutură. Dimensionarea acestora — determinarea debitelor, calculul numărului de talere sau a înălțimii umpluturii din coloană — se aseamănă foarte mult cu dimensionarea coloanelor de rectificare; diferențierile se referă atît la forma diagramei de echilibru, cît și la modul de exprimare a concentrațiilor și a debitelor.

1) Bilanțul de materiale

Forma ecuației bilanțului de materiale nu depinde de tipul aparatului în care se realizează absorbția, ci numai de sensul în care circulă cele două fluide. În figura 176 s-a schițat o coloană de absorbție, în care concentrațiile celor două faze, pe întreaga coloană, variază de la Y_1 la Y_2 în faza gazoasă și de la X_2 la X_1, în faza lichidă. Pe la baza coloanei intră amestecul gazos format din componenta solubilă A, avînd concentrația Y_1 și componenta insolubilă (inertul) B. Pe la partea superioară a coloanei intră lichidul absorbant avînd concentrația X_2 în componenta solubilă a gazului. Gazul și lichidul circulă în contracurent, cea mai mare parte din componenta A se absoarbe în lichid, astfel încît la ieșirea din coloană, pe la partea superioară, gazul va avea concentrația $Y_2 < Y_1$, iar lichidul concentrația $X_1 > X_2$. Notînd cu G debitul molar al gazului insolubil (inert) în kmol/s și cu L debitul molar al lichidului absorbant, kmol/s, debitul n_A al componentei A absorbite în coloană, în kmol/s, se poate determina, ținînd seama de constanta mărimilor G și L, din relațiile:

$$n_A = G(Y_1 - Y_2) = L(X_1 - X_2). \tag{178}$$

Dacă bilanțul de materiale se întocmește numai pentru partea superioară a coloanei, deasupra secțiunii AB, în care cele două faze au concentrațiile Y și X, ecuația de bilanț ia forma:

$$G(Y - Y_2) = L(X - X_2). \tag{179}$$

Făcînd raportul L/G, din ecuațiile (178) și (179) se poate scrie relația:

$$\frac{L}{G} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} = \frac{Y - Y_2}{X - X_2}, \tag{180}$$

care poate fi pusă sub forma:

$$Y - Y_2 = \frac{L}{G}(X - X_2), \tag{181}$$

Scanned with OKEN Scanner

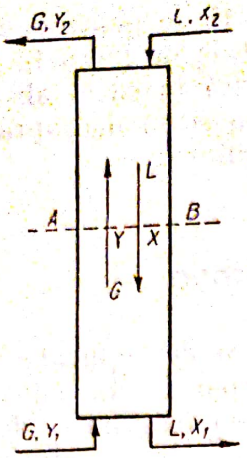


Fig. 176. Schema unei coloane de absorbție.

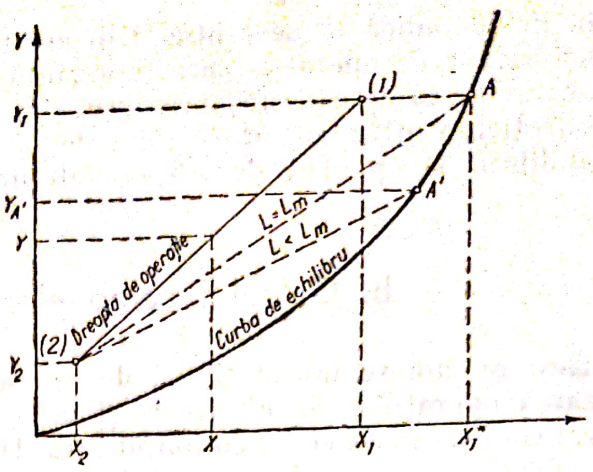


Fig. 177. Linia de operație la absorbție.

care reprezintă ecuația dreptei de operație pentru absorbție, asemănătoare cu ecuațiile dreptelor de concentrare și epuizare stabilite la rectificare. Raportul L/G reprezintă panta dreptei de operare și se poate calcula, din ecuația (180).

Rezultă că dreapta de operație are panta L/G și trece prin punctele (1) de coordonate Y_1, X_1, reprezentînd baza coloanei, și (2) de coordonate Y_2X_2, reprezentînd vîrful coloanei, așa cum se arată în diagrama de echilibru din figura 177. Așa cum rezultă din figură, debitul de lichid nu poate scădea sub o valoare minimă L_m pentru care dreapta de operație intersectează curba de echilibru în punctul A de coordonate Y_1 și $X_1=X_1^*$; pentru o valoare $L<L_m$, dreapta de operație intersectează curba de echilibru într-un punct A_1, căruia îi corespunde o concentrație în faza gazoasă $Y_1<Y_2$ și deci operația nu poate avea loc.

Debitul minim de absorbant în cazul absorbției izoterme (fără efect termic, $t=$const.) se deduce înlocuind în ecuația (180) concentrația în lichid X_1 prin concentrația la echilibru X_1 corespunzătoare concentrației Y_1 în faza gazoasă; ținînd seama și de ecuația pentru absorbția în contracurent se obține:

$$L_m=G(Y_1-Y_2)/(X_1-X_2)=n_A/(X_1-X_2). \qquad (182)$$

Debitul de lucru al lichidului absorbant se calculează cu relația:

$$L=c\cdot L_m, \qquad (183)$$

în care c este un coeficient supraunitar depinzînd de condițiile de funcționare ale coloanei.

2) Calculul coloanelor cu talere

Metodele grafice de determinare a numărului de talere utilizează diagrama de echilibru și, în funcție de principiile pe care se bazează, permit obținerea fie a numărului de talere teoretice, fie, direct, a numărului de talere reale.

Scanned with OKEN Scanner

Ca și în cazul rectificării, construcția grafică (fig. 178) constă în trasarea liniei în trepte între linia de operație și curba de echilibru, începînd din punctul (1) de coordonate Y_1, X_1 pînă la depășirea punctului (2) de coordonate Y_2, X_2; numărul talerelor teoretice este egal cu numărul segmentelor verticale ale liniei în trepte. Numărul de talere reale se obține împărțind numărul de talere teoretice N_t la eficacitatea medie a talerelor E.

Eficacitatea talerelor de absorbție este subunitară și depinde de construcția talerului, de intensitatea circulației celor două fluide etc.

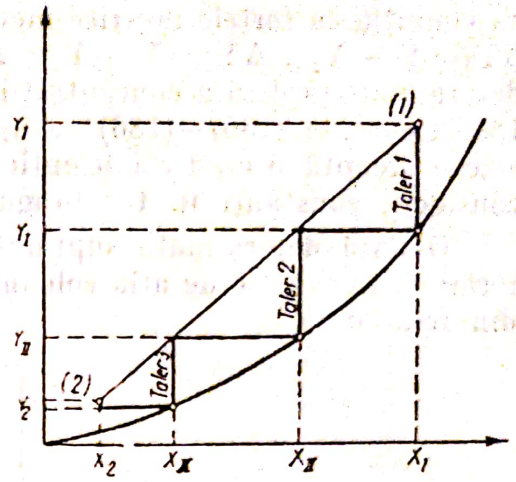


Fig. 178. Determinarea numărului de talere teoretice pentru absorbție.

3) Calculul coloanelor cu umplutură

Ca și la coloanele cu umplutură pentru rectificare, înălțimea umpluturii din coloană care asigură suprafața necesară de contact se determină din numărul de talere teoretice și din ecuația generală a transferului de masă.

Numărul de talere teoretice se determină, ca și la o coloană cu talere, prin construcția grafică indicată în figura 178. Înălțimea umpluturii I se obține înmulțind acest număr, N_t, cu înălțimea echivalentă a unui taler teoretic I.E.T.T.:

$$\boxed{I = N_t(\text{I.E.T.T.}).} \qquad (184)$$

Pe baza ecuației generale a transferului de masă, se poate determina suprafața necesară a umpluturii, scriind ecuația pentru absorbție sub forma:

$$S = \frac{n_A}{k_g \cdot (\Delta Y)_m} = \frac{n_A}{k_l \cdot (\Delta X)_m}, \qquad (185)$$

în care forțele motrice medii $(\Delta Y)_m$ și $(\Delta X)_m$ se calculează ca medie logaritmică cu relațiile (136), între forțele ΔY_1, ΔY_2 și ΔX_1, respectiv ΔX_2 de la baza și vîrful coloanei de absorbție. Semnificația și modul de calcul ale forțelor motrice la baza și vîrful coloanei rezultă din figura 179. Ecuația (185) poate fi scrisă și pentru coeficienții parțiali de transfer de masă k_g și k_l:

$$S = \frac{n_A}{k_g \cdot (\Delta Y)_m} = \frac{n_A}{k_l \cdot (\Delta X)_m}. \qquad (186)$$

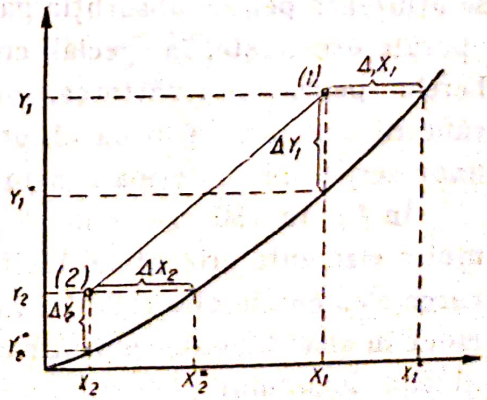


Fig. 179. Forțele motrice în cazul absorbției.

cu condiția ca forțele motrice medii să se refere la concentrațiile la interfață: $\Delta Y_1 = Y_1 - Y_{1,i}$; $\Delta Y_2 = Y_2 - Y_{2,i}$; $\Delta X_1 = X_{1,i} - X_1$; $\Delta X_2 = X_{2,i} - X_2$; modul de determinare grafică a concentrațiilor la interfață Y_i și X_i s-a arătat în figura 158. Ecuațiile (185)—(186) se aplică numai atunci cînd linia de echilibru este o dreaptă și cînd coeficienții parțiali și totali de transfer de masă se pot considera constanți în tot lungul coloanei.

O dată determinată suprafața umpluturii S, înălțimea acesteia se determină, în funcție de aria coloanei A_c și de suprafața specifică a umpluturiii din relația:

$$I = \frac{S}{A_c \cdot \sigma} \qquad (187)$$

Trebuie avut în vedere că suprafața S nu reprezintă suprafața nominală a umpluturii, ci suprafața udată a acesteia, care participă efectiv la realizarea contactului dintre cele două faze.

c. Tipuri de absorbere

Construcția utilajelor în care se realizează operația de absorbție, numite **absorbere,** urmărește asigurarea unor condiții cît mai bune de desfășurare a operației, atît în privința suprafeței de contact dintre gaz și lichid, cît și în ceea ce privește vitezele și sensul de deplasare a celor două fluide. După modul de realizare a suprafeței de contact, absorberele se pot împărți, în mod convențional, în patru mari categorii: **absorbere de suprafață, absorbere prin pulverizare, absorbere prin barbotare și absorbere cu umplutură.**

1) Absorbere de suprafață

Denumirea acestor absorbere provine din faptul că în urma contactului dintre cele două fluide nu se creează o suprafață nouă, gazul deplasîndu-se în lungul suprafeței prezentată de lichidul absorbant în curgere. Deoarece suprafața de contact dintre gaz și lichidul absorbant este mică, aceste absorbere se utilizează pentru absorbția gazelor cu solubilitate mare. Construcția acestor aparate urmărește, în special, crearea unei suprafețe exterioare mari a absorberelor pentru îndepărtarea, cu ușurință, prin răcire cu apă sau cu aer, a căldurii degajate în urma absorbției; uneori răcirea se realizează cu ajutorul unor serpentine interioare prin care circulă apa de răcire.

În figura 180 este schițat un absorber în formă de serpentină din mai multe elemente orizontale, răcit cu apă prin stropire; lichidul absorbant parcurge elementele absorberului în contracurent cu gazul, trecerea dintr-un element în altul făcîndu-se printr-un deversor, a cărui înălțime menține constant nivelul lichidului.

În figura 181 este reprezentat un absorber tubular, vertical, asemănător schimbătoarelor de căldură, în care lichidul absorbant distribuit la partea

Scanned with OKEN Scanner

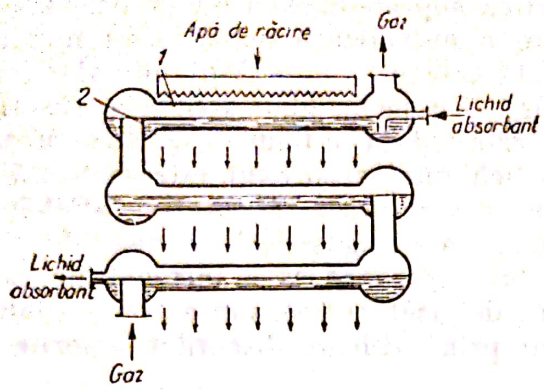


Fig. 180. Absorber de suprafață:
1 — element orizontal; 2 — deversor.

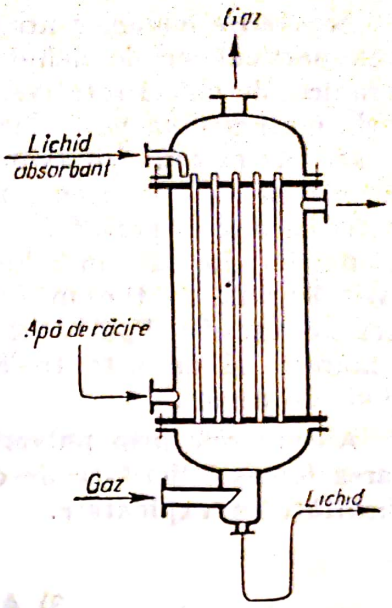


Fig. 181. Absorber tubular.

superioară se prelinge sub formă de film pe suprafața interioară a țevilor în contracurent cu gazul care curge prin țevi de jos în sus; căldura de absorbție se îndepărtează prin răcire cu apa care circulă prin spațiul intertubular.

2) Absorbere prin pulverizare

La utilajele din această categorie — *scruberele fără umplutură și scruberele mecanice* — mărirea suprafeței de contact dintre cele două faze se realizează prin pulverizarea lichidului absorbant.

Scruberele fără umplutură sînt cele mai simple utilaje de absorbție reprezentînd coloane goale prin care gazul circulă de jos în sus, în contracurent cu lichidul absorbant pulverizat fin la partea superioară a coloanei; pentru separarea picăturilor de lichid antrenate la ieșire, gazul trece printr-un strat de umplutură.

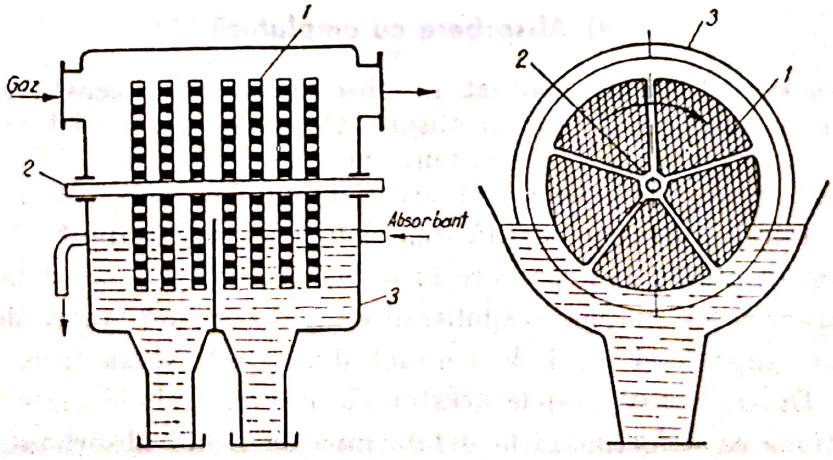


Fig. 182. Scruber mecanic cu arbore orizontal:
1 — discuri perforate; 2 — arbore; 3 — carcasa scruberului.

Scanned with OKEN Scanner

Scruberele mecanice urmăresc mărirea suprafeţei de contact prin micşorarea particulelor de lichid ca urmare a pulverizării acestuia cu mijloace mecanice, de obicei rotative. Din această categorie, mai răspîndite sînt scruberele mecanice cu pulverizare prin discuri; schema unui asemenea absorber — scruber mecanic cu ax orizontal — este redată în figura 182. La scruberul mecanic cu ax orizontal, pulverizarea lichidului absorbant este realizată de o serie de discuri perforate, fixate pe un arbore orizontal rotativ, astfel încît sînt parţial afundate în lichidul absorbant care se găseşte la partea inferioară a scruberului. În timpul rotirii, lichidul absorbant este antrenat de către discurile rotative şi pulverizat sub formă de picături fine; suprafaţa de contact se măreşte şi datorită trecerii gazului prin orificiile discurilor umezite cu lichid absorbant.

Absorberele prin pulverizare au eficacitate bună de absorbţie însă utilizarea lor este limitată de consumul ridicat de energie, precum şi de unele dificultăţi în exploatare.

3) Absorbere prin barbotare

În absorberele din această categorie suprafaţa de contact se realizează datorită trecerii gazului divizat în bule de dimensiuni cît mai mici prin stratul de lichid absorbant. Cele mai răspîndite utilaje din această categorie sînt coloanele cu talere, asemănătoare constructiv şi funcţional cu cele folosite pentru rectificare. Se utilizează toate tipurile de talere prezentate la rectificare, mai răspîndite fiind însă coloanele cu talere cu clopote. Atunci cînd este necesară îndepărtarea căldurii de absorbţie, se prevăd serpentine sau dispozitive tubulare de răcire cu apă.

Dezavantajele coloanelor cu talere se referă la construcţia lor complicată, la pierderea mare de presiune la trecerea gazului; prezintă avantajul că pot fi folosite şi pentru operaţiile de absorbţie din care rezultă precipitate.

Distanţa dintre talere pentru coloana cu diametrul de pînă la 1 500 mm se ia egală cu 400 mm; pentru diametre mai mari distanţa dintre talere se poate mări pînă la 600 mm.

4) Absorbere cu umplutură

Mărirea suprafeţei de contact în absorberele din această categorie se realizează prin curgerea lichidului absorbant sub forma unui film subţire pe suprafaţa umpluturii, în contracurent cu amestecul gazos. Construcţia şi funcţionarea acestor absorbere sînt asemănătoare cu cele ale coloanelor cu umplutură folosite pentru rectificare. Coloanele cu umplutură reprezintă tipul cel mai răspîndit de absorbere în industria chimică. Acest fapt se datoreşte construcţiei lor simple, posibilităţii de realizare din materiale rezistente la coroziune, suprafeţei mari de contact dintre cele două faze, întreţinerii uşoare etc. Dintre dezavantajele acestor absorbere, trebuie luate în consideraţie: funcţionarea defectuoasă la debite mici de lichid absorbant, dificultăţi de evacuare a căldurii de absorbţie, imposibilitatea utilizării pentru operaţiile de absorbţie din care rezultă precipitate.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicații

Exercițiul 1

Într-o coloană cu umplutură se absoarbe în apă CO_2 dintr-un amestec de gaze. Concentrația CO_2 în gaz la intrare în coloană este $Y_1=0,1$, iar concentrația la ieșire din coloană $Y_2=0,003$; concentrația CO_2 în lichid la intrare în coloană $X_2=1,025\cdot10^{-5}$ kmol/kmol. Debitul amestecului gazos (considerat în condiții normale) $Q_v=1\,000$ m³/h. Absorbția are loc la o presiune totală $p=15$ atm și la o temperatură $t=25°C$.

Se cere: 1) să se traseze curba de echilibru; 2) să se determine debitul minim al apei de absorbție; 3) să se traseze dreapta de operație pentru un debit al apei de absorbție de două ori mai mare decît debitul minim; 4) debitul n_A de CO_2 absorbit.

Rezolvare

1) Trasarea curbei de echilibru. Bioxidul de carbon fiind un gaz greu solubil în apă, pentru construirea curbei de echilibru se poate utiliza legea lui Henry sub forma ecuației (177):

$$Y=\frac{mX}{1+(1-m)X},$$

în care $m=H/p$. Constanta lui Henry la 25°C pentru soluții apoase de CO_2 are valoarea $H=1,64\cdot10^3$ atm și deci $m=1,64\cdot10^3/15=109,33$. Deoarece diagrama de echilibru se construiește în coordonate Y, X, concentrațiile fazei gazoase Y_1, Y_2 se transformă în rapoarte molare cu ajutorul relațiilor:

$$Y_1=\frac{y_1}{1-y_1}=\frac{0,1}{1-0,1}=0,11 \text{ kmol/kmol};$$

$$Y_2=\frac{y_2}{1-y_2}=\frac{0,003}{1-0,003}=0,003 \text{ kmol/kmol}.$$

Pentru calculul concentrațiilor de echilibru cu ecuația (177) se dau lui X valori începînd de la $X=1,025\cdot10^{-5}$ (corespunzătoare concentrației CO_2 în apă la intrare în coloană) pînă la o valoare căreia îi corespunde pentru Y o valoare care depășește concentrația la intrare $Y_1=1=0,11$. Valorile obținute cu ecuația (177) sînt următoarele:

X^*	$1,025\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$6\cdot10^{-4}$	$8\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-3}$
Y^*	$1,12\cdot10^{-3}$	$1,11\cdot10^{-2}$	$2,24\cdot10^{-2}$	$4,56\cdot10^{-2}$	$7\cdot10^{-2}$	$9,6\cdot10^{-2}$	$1,215\cdot10^{-1}$

Cu ajutorul acestor date s-a construit curba de echilibru din figura 183.

2) Debitul minim al apei de absorbție. Se determină înlocuind în ecuația (182) valoarea concentrației de echilibru X_1 a CO_2 în lichid corespunzătoare concentrației în gaz $Y_1=0,11$, obținută din diagrama din figura 179, X $9,06\cdot10^{-4}$:

$$L_m=G(Y_1-Y_2)/(X_1^*-X_2)=\frac{1\,000}{22,4}\cdot\frac{0,11-0,003}{(9,06-0,1025)10^{-4}}=44,5\frac{0,107}{8,9575\times10^{-4}}=$$

$$=5,35\cdot10 \text{ kmol/h}.$$

3) Trasarea liniei de operație. Se calculează mai întîi debitul real al apei de stropire din relația:

$$L=c\cdot L_m=2,5350=10\,700 \text{ kmol/h}.$$

Scanned with OKEN Scanner

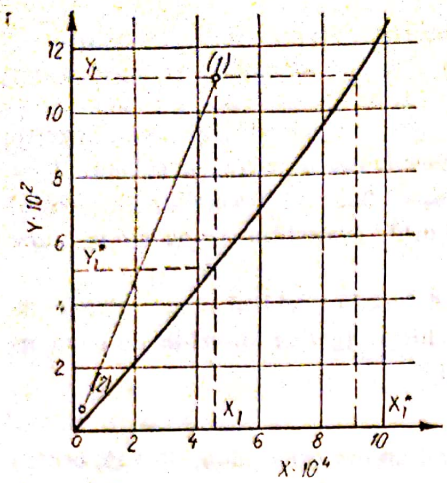


Fig. 183. Diagrama de echilibru a exercițiului 1.

Se știe că linia de operație este o dreaptă care trece prin punctele (1) de coordonate Y_1, X_1 și (2) de coordonate Y_2, X_2; dintre acestea singura necunoscută este X_1. Concentrația CO_2 în apă la ieșirea din coloană X_1 se calculează din relația (177) scrisă sub forma:

$$X_1 = \frac{G(Y_1 - Y_2)}{L} + X_2$$

$$X_1 = \frac{44{,}5 \times 0{,}107}{10\,700} +$$

$$+1{,}025 \times 10^{-5} = 0{,}0004587 \text{ kmol/kmol.}$$

Prin unirea punctelor (1) și (2) se obține dreapta de operație cerută.

4) Debitul molar de CO_2 absorbit se calculează din relația:

$$n_A = G(Y_1 - Y_2) = 44{,}5(0{,}11 - 0{,}003) = 44{,}5 \times 0{,}107 = 4{,}76 \text{ kmol/h.}$$

Exercițiul 2

În condițiile exemplului precedent, să se calculeze forța medie de acțiune între capetele coloanei.

Rezolvare

Considerînd curba de echilibru dreaptă, se calculează forța medie de acțiune.

Pentru faza gazoasă, forțele de acțiune la baza și la vîrful coloanei au valorile:

— la baza coloanei: $\Delta Y_1 = Y_1 - Y_1^* = 0{,}11 - 0{,}05 = 0{,}06$;

— la vîrful coloanei: $\Delta Y_2 = Y_2 - Y_2^* = 0{,}0003 - 0{,}00112 = 0{,}00188$.

Forța medie de acțiune pentru faza gazoasă va avea valoarea:

$$(\Delta y)_m = \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{2{,}3 \log \frac{\Delta Y_1}{\Delta Y_2}} = \frac{0{,}06 - 0{,}00188}{2{,}3 \log \frac{0{,}06}{0{,}00188}} = 0{,}01685 \text{ kmol/kmol}$$

Pentru faza lichidă forțele de acțiune au valorile:

— la baza coloanei: $\Delta X_1 = X_1 - X_1^* = 9{,}06 \times 10^{-4} - 4{,}587 \times 10^{-4} = 4{,}473 \cdot 10^{-4}$

— la vîrful coloanei: $\Delta X_2 = X_2 - X_2^* = 3{,}025 \times 10^{-5} - 1{,}025 \times 10^{-5} = 2 \times 10^{-5}$.

Forța medie de acțiune pentru faza lichidă va avea valoarea:

$$(\Delta X)_m = \frac{\Delta X_1 - \Delta X_2}{2{,}3 \log \frac{\Delta X_1}{\Delta X_2}} = \frac{4{,}473 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}}{2{,}3 \log \frac{44{,}73}{2}} = 0{,}000138 \text{ kmol/kmol}$$

Exercițiul 3

Să se calculeze înălțimea stratului de umplutură pentru realizarea separării cerută în exemplul 1 într-o coloană cu diametrul $d_c = 2\,150$ mm, folosind ca umplutură inele Raschig $75 \times 75 \times 10$ mm. Se dau coeficienții totali de transfer de masă; $K_y = 0{,}25 \text{ kmol/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$, $K_l = 32{,}32 \text{ kmol/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$.

Rezolvare

Pentru calculul suprafeței umpluturii se utilizează ecuațiile (185) pentru cazul cînd linia de echilibru este o dreaptă, iar coeficienții totali de transfer de masă K_g și K_l se pot considera constanți. Se obține astfel:

$$S = \frac{n_A}{K_g(\Delta Y)_n} = \frac{4{,}76}{0{,}25 \times 0{,}01685} = 1\,130 \text{ m}^2$$

— cu ajutorul coeficientului total K_l raportat la faza lichidă:

$$S = \frac{n_A}{K_l(\Delta Y)_n} = \frac{4{,}76}{32{,}32 \times 0.000138} = 1\,070 \text{ m}^2$$

În mod normal ar fi trebuit ca pentru ambele faze să se fi obținut aceeași valoare pentru suprafața umpluturii; diferența între valorile calculate se datorește faptului că linia de echilibru nu este o dreaptă. Valoarea mai apropiată de realitate este cea calculată pentru faza gazoasă.

Înălțimea coloanei de umplutură se calculează cu relația (187); înlocuind suprafața specifică a umpluturii σ cu valoarea umpluturii alese, $\sigma = 65{,}5$ m²/m³ și aria coloanei $A_c = \pi d_c^2/4 = 3{,}14(2{,}15)^2/4 = 3{,}63$ m²; se obține:

$$I = \frac{S}{A \cdot \sigma} = \frac{1\,130}{3{,}63 \times 65{,}6} = 4{,}75 \text{ m.}$$

Valoarea suprafeței specifice σ s-a luat din tabele, pentru inele Raschig $75 \times 75 \times 10$ mm.

Verificarea cunoștințelor

1. Enunțați legea lui Henry.
2. Cum se construiește diagrama de echilibru pentru un sistem gaz-lichid?
3. Ce reprezintă debitul minim de lichid absorbant?
4. Prezentați constructiv și funcțional principalele tipuri de absorbere.
5. Ce operații se efectuează înaintea punerii în funcțiune a scruberului mecanic?
6. În ce constă întreținerea zilnică a unui scruber?

4. EXTRACȚIA

Extracția este operația de separare a componentelor unui amestec pe baza diferenței între solubilitatea acestora în unul sau mai mulți dizolvanți. Pentru realizarea operației de extracție într-un aparat numit extractor, amestecul de separat (A+B) se tratează cu un dizolvant potrivit (S), astfel încît în urma unei omogenizări cît mai bune, substanța care se extrage (B) din amestec trece în dizolvant, formînd împreună cu acesta (B+S) **extractul**, iar restul amestecului inițial (A), care nu este solubil în dizolvant, formează **rafinatul.** În realitate, întotdeauna extractul conține și mici cantități din componentele insolubile (A), iar rafinatul conține încă cantități mai mari sau mai mici din componentele solubile (B); uneori rafinatul conține și mici cantități de dizolvant. *Extractul și rafinatul fiind nemiscibil, se separă prin sedimentare și decantare urmînd apoi separarea componentelor solubile și recuperarea dizolvantului din extract printr-o operație potrivită, de obicei distilare;* dacă este necesar se face recuperarea dizolvantului și din rafinat.

Scanned with OKEN Scanner

Cînd amestecul supus extracţiei este solid, operaţia se numeşte *extracţie solid-lichid*; operaţia se numeşte *extracţie lichid-lichid sau rafinare cu solvent selectiv*, cînd amestecul supus separării reprezintă o soluţie de două sau mai multe lichide.

a. Extracţia lichid-lichid

Extracţia lichid-lichid constă în punerea în contact a amestecului lichid de separat cu un dizolvant selectiv insolubil sau greu solubil în amestecul iniţial. Procedeele şi utilajele de extracţie urmăresc crearea unor condiţii cît mai apropiate de echilibru între cele două faze, astfel încît cea mai mare parte a componentei solubile să treacă în extract, iar rafinatul obţinut să fie practic lipsit de dizolvant şi de componenta solubilă.

Separarea unui amestec prin extracţia lichid-lichid constă din următoarele trei faze principale:

1) amestecarea cît mai intensă a amestecului iniţial de separat cu dizolvantul;

2) separarea celor două faze lichide ale sistemului — extractul şi rafinatul — prin sedimentare şi decantare;

3) recuperarea dizolvantului din rafinat şi extract.

Un amestecător şi un decantor constituie o unitate de extracţie asemănătoare, funcţional, cu unitatea de contact — talerul — de la coloanele de rectificare. O unitate în care separarea realizată prin extracţie corespunde concentraţiilor de echilibru între cele două faze se numeşte *unitate teoretică de extracţie.*

1) Echilibrul lichid-lichid

Pentru studiul echilibrului lichid-lichid la extracţie se utilizează în mod obişnuit graficul ternar care foloseşte un triunghi echilateral (fig. 184), avînd cele trei laturi divizate în o sută părţi egale, corespunzător concentraţiei exprimate în procente molare sau masice. Într-un asemenea grafic, cele trei componente ale sistemului — dizolvantul iniţial al amestecului A, componenta care se extrage B şi dizolvantul de extracţie S — sînt reprezentate prin vîrfurile triunghiului care corespund concentraţiilor de 100%. Punctele care se găsesc pe laturile triunghiului reprezintă amestecuri binare între componentele vîrfurilor corespunzătoare laturii.

Compoziţia unui amestec ternar reprezentat prin punctul M, situat în interiorul triunghiului, se determină ducînd din acest punct drepte paralele la laturile triunghiului. Echilibrul între cele două faze ale sistemului ABS considerat se reprezintă prin curba de echilibru R_xCE_x numită **curbă binodală.** Orice amestec ternar situat sub curba de echilibru se separă în două faze: extractul E îmbogăţit în componenta B şi rafinatul R format din amestecul sărăcit în componenta B şi avînd concentraţiile în echilibru y_B şi x_B. Liniile care unesc compoziţiile celor două faze în echilibru — RE pentru amestecul M din figura 184 — se numesc drepte de legătură sau *conode.* Punctul C, numit

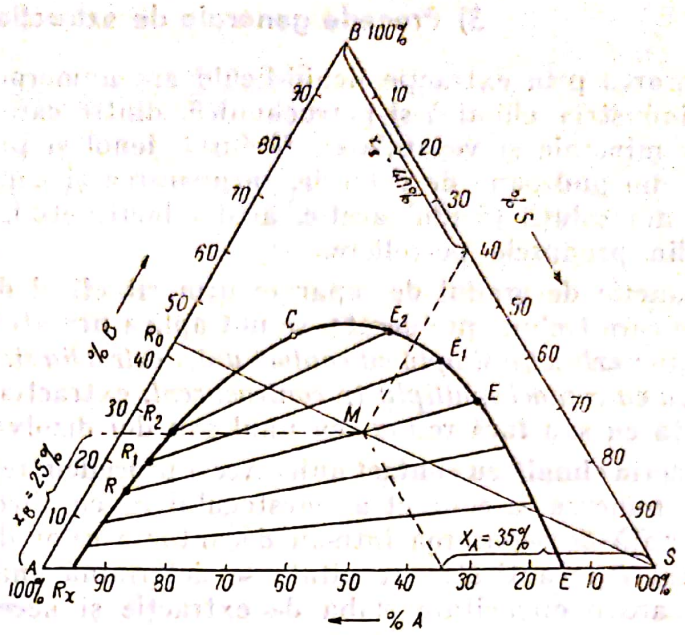


Fig. 184. Graficul ternar pentru calculul operației de extracție.

punct critic, corespunzînd miscibilității totale a celor trei componente, se caracterizează prin egalitatea concentrațiilor în cele două faze — extractul și rafinatul, $y_B = x_B$.

2) Bilanțul de materiale

Punctul M din graficul ternar reprezintă amestecul ternar obținut dintr-un amestec inițial (reprezentat prin punctul R_0 pe latura AB) conținînd $x_B = 42{,}5\%$, componentă B cu dizolvantul pur S reprezentat prin vîrful S al triunghiului. Bilanțul total al primei faze a operației de extracție — amestecarea — se reprezintă, notînd cu M cantitatea amestecului obținut, cu R_0 cantitatea amestecului inițial, prin relația:

$$\boxed{M = R_0 + S.} \qquad (188)$$

În graficul ternar, cantitatea M de amestec obținut este proporțională cu segmentul $\overline{R_0 S}$, iar cantitățile R_0 și S cu segmentele inverse poziției lor, adică $\overline{SM}$ și respectiv $\overline{R_0 M}$.

Măsurînd pe diagramă lungimea segmentului $\overline{R_0 M}$, cantitățile necesare de amestec inițial R_0 și de solvent S se calculează din relațiile:

$$R_0 = M\frac{\overline{SM}}{\overline{R_0 S}}; \qquad S = M\frac{\overline{R_0 M}}{\overline{R_0 S}}, \qquad (189)$$

segmentele $\overline{SM}$ și $\overline{R_0 M}$, fiind de asemenea măsurate pe diagramă.

După amestecarea cît mai intensă, componenta B trece, în cea mai mare parte, în extract, astfel încît după sedimentare amestecul ternar M se separă în două faze: rafinatul R și extractul E.

3) Procede generale de extracție

Separarea prin extracție lichid-lichid are numeroase și importante aplicații în industria chimică și petrochimică, dintre care se pot cita: rafinarea uleiurilor minerale și vegetale cu furfurol, fenol și propan lichid, separarea fenolului din gudroane de cocserie, recuperarea și concentrarea substanțelor organice din soluții (acidul acetic, acidul lactic etc.), îndepărtarea mercaptanilor din produsele petroliere.

În funcție de gradul de separare urmărit cît și de cantitățile (debitele) de lichide care trebuie prelucrate, se pot aplica următoarele procedee generale de extracție: *extracția simplă cu contact unic, extracția simplă cu contact multiplu* și *extracția cu contact multiplu în contracurent*; extracția în contracurent poate fi realizată cu sau fără reflux, cu unul sau doi dizolvanți de extracție.

Extracția simplă cu contact unic. Acest procedeu, reprezentat în figura 185, constă în punerea în contact a amestecului R_0 cu dizolvantul S într-un agitator, urmată de separarea într-un decantor a celor două faze, extractul E_1 și rafinatul R_1; cantitățile rezultate se determină analitic sau grafic. Acest procedeu are o eficacitate slabă de extracție și necesită un consum mare de dizolvant.

Extracția simplă cu contact multiplu. Este o repetare a procedeului de extracție simplă cu contact unic, așa cum se arată în schema din figura 186, dizolvantul adăugîndu-se în mai multe porțiuni în scopul obținerii unei separări cît mai înaintate. Procedeul se poate realiza discontinuu, în aceeași unitate de extracție, sau continuu, în mai multe unități așezate în serie. Așa cum rezultă din figura 186, rafinatul obținut în prima unitate de extracție R_1 este tratat în continuare cu dizolvant pînă la îndepărtarea cît mai înaintată a componentei B. Numărul unităților de extracție necesare unei separări date se determină cu ajutorul graficului ternar, repetînd construcția grafică de la extracția simplă cu contact unic, pînă la depășirea concentrației cerute rafinatului final R_n; din graficul din figura 186, *b* rezultă că sînt necesare trei unități teoretice de extracție. Solventul S_1, S_2, S_3 se poate adăuga în cantități egale sau diferite.

Deficiențele acestui procedeu de extracție se referă la consumul relativ ridicat de dizolvant, ceea ce duce la o concentrație mică a extractului total obținut, care reprezintă un amestec de extracție, E_1, E_2, E_3 de concentrații din ce în ce mai mici.

Extracția cu contact multiplu în contracurent. Acest procedeu asigură un grad înalt de separare, cu un consum scăzut de dizolvant, prin aplicarea principiului contracurentului între amestecul se separat și dizolvant. Amestecul de separat R_0 este introdus în prima unitate de extracție, iar dizolvantul, notat în acest caz în E_{N+1}, în ultima unitate; corespunzător acestei scheme de circulație, extractul final E_1 se va obține din prima unitate de extract, iar rafinatul R_N din ultima, așa cum se indică în schema din figura 187. În acest procedeu, dizolvantul proaspăt întîlnește rafinatul aproape epuizat, din care extrage ultimele cantități din componenta B, ca apoi, după multe extracții succesive, ajunge în prima unitate de extracție, unde întîlnește amestecul final R_0 bogat, din care, extrăgînd componenta solubilă, ajunge într-o stare destul de apropiată de cea de saturație; ca rezultat, separarea cerută se realizează cu un consum redus de solvent.

Scanned with OKEN Scanner

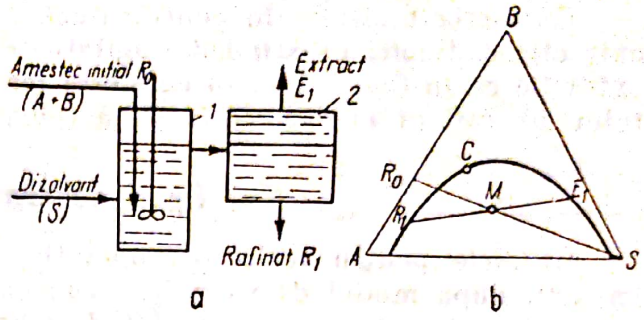


Fig. 185. Extracția simplă cu contact unic:

a — schema de principiu; *b* — reprezentarea în graficul ternar; *1* — agitator; *2* — decantor.

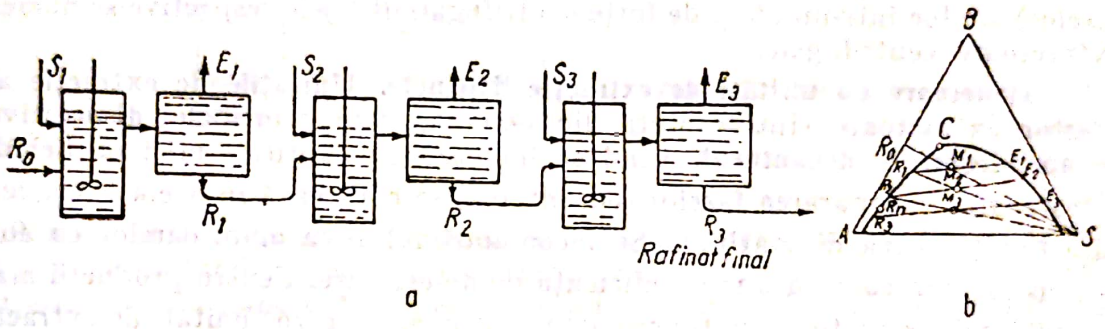


Fig. 186. Extracția simplă cu contact multiplu:

a — schema de principiu; *b* — reprezentarea grafică în graficul ternar.

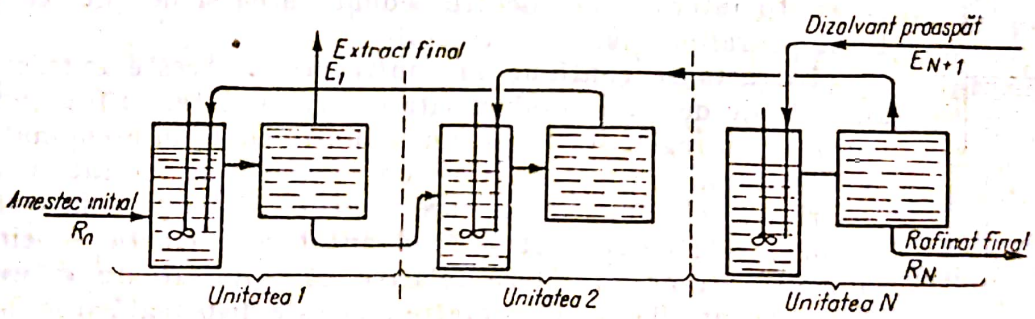


Fig. 187. Schema de principiu a extracției cu contact multiplu în contracurent.

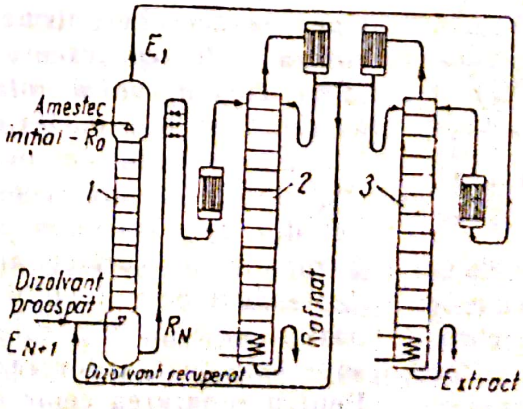


Fig. 188. Extracția continuă cu contact multiplu în contracurent cu coloană de extracție:

1 — coloană de extracție; *2, 3* — coloane de rectificare.

Extracția multiplă în contracurent se poate realiza fie în unități de extracție distincte, constînd din agitatoare și decantoare, fie din coloane de extracție ca în figura 188, în care este reprezentată și recuperarea dizolvantului din rafinat în extract în două coloane separate de rectificare.

4) Tipuri de extractoare

Utilajele pentru realizarea operației de extracție lichid-lichid se pot împărți, după modul de variație a concentrațiilor celor două faze, în două mari categorii: *extractoare cu unități de extracție distincte* și *extractoare continue în contracurent*. Cînd operația de extracție (amestecarea, extracția și separarea fazelor) are loc într-un cîmp de forțe centrifugal, utilajele respective se numesc extractoare centrifugale.

Extractoare cu unități de extracție distincte. Unitățile de extracție ale acestor extractoare sînt formate din două aparate principale: **dispozitivul de amestecare** și **decantorul.** Cînd se lucrează cu cantități mici de lichide, amestecarea și separarea fazelor (decantarea) se realizează în același recipient care funcționează discontinuu. Se recomandă folosirea agitatoarelor cu elice sau cu turbină care au o mare eficiență de amestecare. Pentru producții mari se utilizează extractoare cu funcționare continuă, ale căror unități de extracție constau din dispozitive de agitare de volum mic (șicane sau duze montate în conducte sau coloane, injectoare utilizînd ca fluid motor unul din fluide, pompe centrifuge afundate în lichid) prevăzute cu spații intermediare pentru sedimentarea și decantarea continuă a rafinatului și extractului.

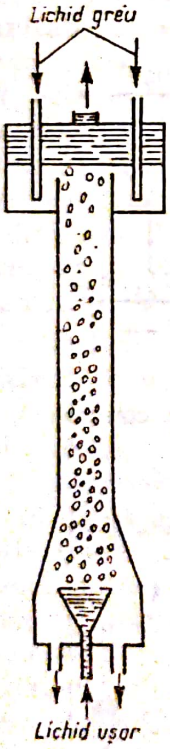


Fig. 189. Coloană cu pulverizarea fazei disperse.

Extractoare continue în contracurent. Aceste extractoare sînt utilaje de mare productivitate și eficacitate, cu funcționare continuă în regim staționar, unele dintre ele fiind asemănătoare — funcțional și constructiv — cu coloanele de rectificare și de absorbție. Cele două fluide care urmează să fie puse în contact — amestecul de separat și dizolvantul de extracție — circulă în contracurent cu viteze relative corespunzătoare diferenței dintre densitățile lor. Una dintre faze este dispersată și se deplasează sub formă de picături sau film de lichid, pe suprafețele de contact, prin cealaltă fază continuă; suprafața de transfer de masă corespunde suprafeței prezentată de faza dispersă.

După modul în care se realizează dispersarea fazei discontinue, se deosebesc următoarele tipuri principale de extractoare continue în contracurent: *cu pulverizarea fazei disperse, cu talere, cu umplutură, rotative și centrifugale*; majoritatea acestor extractoare fac parte din categoria aparatelor tip coloană.

Extractoare cu pulverizarea fazei disperse sînt coloane, (fig. 189), în care, cele două fluide circulă în contracurent: lichidul ușor introdus pe la baza coloanei este dispersat sub formă de picături cu ajutorul unor duze de pulverizare și se deplasează prin lichidul greu (faza continuă) alimentat de la partea superioară a coloanei; contactul dintre faze se face pe suprafața picăturilor rezultate din dispersarea lichidului ușor. Pentru separarea celor două faze, atît la baza cît și la vîrful

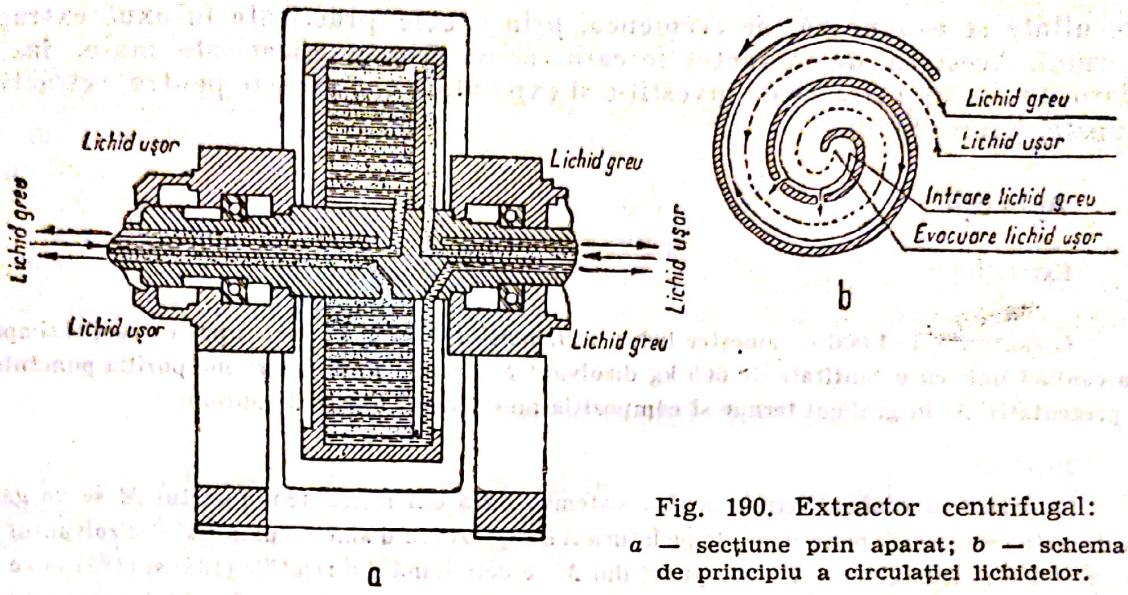


Fig. 190. Extractor centrifugal:
a — secțiune prin aparat; *b* — schema de principiu a circulației lichidelor.

coloanei, sînt zone de decantare, cu secțiune mai mare. Extractoarele cu pulverizarea fazei disperse se caracterizează prin productivitate mare; eficacitatea lor este slabă datorită coalescenței picăturilor fazei disperse și formării unor circuite locale de lichid.

Extractoarele cu talere se aseamănă foarte mult cu coloanele cu talere de rectificare și de absorbție. Se folosesc, în special, coloanele cu talere site și mai rar coloanele cu talere cu clopote; dispersarea fazei discontinue are loc la trecerea acesteia prin orificiile talerelor. Distanța între talere este mai mică decît la coloanele de absorbție și de rectificare, nedepășind 100—150 mm. Eficacitatea talerelor este destul de mică, variind în limite cuprinse între 5 și 30%, datorită formării unor zone staționare de lichid.

Coloanele de extracție cu umplutură realizează contactul între cele două faze (amestecul și dizolvantul) pe suprafața umpluturii, constituită în general din inele Raschig și șei Berl. Coloanele de extracție cu umplutură prezintă avantajul construcției simple; productivitatea și eficacitatea lor însă nu sînt prea ridicate.

Pentru punerea în contact a unor lichide cu diferență mică de densitate, mărirea vitezei relative a acestora, intensificarea amestecării și dispersării fazelor se realizează prin efectuarea operației de extracție *într-un cîmp de forțe centrifugal.*

Cel mai răspîndit *tip de utilaj centrifug este extractorul orizontal* schițat în figura 190. Spațiul de extracție al acestui aparat este o spirală cu secțiune dreptunghiulară, montată pe un arbore care se rotește cu 3 000—5 000 rot/min; delimitarea spațiului spiral se realizează cu ajutorul unei table spirale perforate (figura 190, *b*). Cele două lichide sînt introduse în spațiul de extracție cu ajutorul unor pompe, prin arborele extractorului: lichid greu în centru, iar lichidul ușor în canalul periferic.

Ca urmare a rotirii spațiului de extracție, cele două lichide circulă în contracurent, dispersîndu-se la trecerea prin orificiile tablei perforate și separîndu-se în canale sub influența forței centrifuge, astfel încît se realizează o intensificare deosebită a transferului de masă; rafinatul și extractul

rezultate se evacuează, de asemenea, prin canale practicate în axul extractorului. Acest tip de extractor se caracterizează prin eficacitate mare, însă, datorită costului ridicat de investiție și exploatare se folosește pentru extracția substanțelor scumpe.

Aplicații

Exercițiul 1

O cantitate de 1 000 kg amestec lichid AB, conținînd 43% B, este supus extracției simple cu contact unic cu o cantitate de 665 kg dizolvant S. Se cere să se determine poziția punctului reprezentativ M în graficul ternar și compoziția amestecului global M obținut.

Rezolvare

Se consideră graficul ternar pentru sistemul ABS din figura 184. Punctul M se va găsi pe dreapta care unește punctul R_0 de pe latura AB reprezentînd amestecul inițial și dizolvantul S din vîrful S al triunghiului. Poziția punctului M se determină din relațiile (188) și (189) în care sînt cunoscute cantitățile de amestec inițial $R_0=1\,000$ kg și de solvent $S=665$ kg; segmentul de dreaptă R_0S măsurat pe diagrama din figura 198 are valoarea $R_0S=84$ mm. Înlocuind în relațiile (188) și (189), se obține: $M=1\,000+665=1\,665$ kg.

$$\overline{R_0M}=\overline{R_0S}\,\frac{S}{M}=84\,\frac{665}{1\,665}=33{,}3 \text{ mm}.$$

Punctul M se găsește măsurînd pe dreapta R_0S segmentul calculat $R_0M=33{,}3$ mm. Compoziția amestecului M se găsește ducînd din acest punct drepte paralele la laturile triunghiului opuse vîrfului care reprezintă componenta pură a cărei concentrații se determină. Se obține astfel: $x_A=35\%$; $x_B=25\%$; $x_S=40\%$.

Exercițiul 2

În condițiile exemplului precedent să se calculeze cantitățile produselor obținute în urma extracției, extractul E și rafinatul R.

Rezolvare

Amestecul M se separă în cele două faze: extractul E și rafinatul R, care sînt în echilibru; cele trei puncte sînt coliniare, fiind situate pe conoda RE. Măsurînd lungimea acestei conode pe graficul din figura 184, se găsește valoarea $\overline{RE}=57$ mm; segmentele $\overline{RM}$ și $\overline{EM}$ au, respectiv, valorile $\overline{RM}=38$ mm și $\overline{EM}=19$ mm.

Din regula amestecurilor rezultă:

$$R=M\frac{\overline{EM}}{\overline{ER}}=1\,665\,\frac{19}{57}=555 \text{ kg} \qquad E=M\,\frac{\overline{RM}}{\overline{ER}}=1\,665\,\frac{38}{57}=1\,110 \text{ kg}.$$

Verificînd se obține: $M=E+R=555+1\,110=1\,665$ kg.

Verificarea cunoștințelor

1. Cum se reprezintă echilibrul lichid-lichid în cazul extracției?
2. Faceți o comparație a procedeelor de extracție cunoscute.
3. Faceți o clasificare a extractoarelor; care sînt avantajele extractoarelor continue în contracurent?

Scanned with OKEN Scanner

5. FLUIDIZAREA

Fluidizarea nu este o operaţie unitară, ci reprezintă o tehnică de lucru de intensificare a contactului dintre fluide şi solide granulare sau pulverulente.

Prin fluidizare, un strat de granule solide este adus într-o stare de continuă agitare în curentul de fluid (agentul de fluidizare, gaz sau lichid) de care este străbătut cu o viteză determinată, astfel încît sistemul fluid-solid format — stratul fluidizat — are proprietăţi asemănătoare fluidelor; de aici denumirea de fluidizare

a. Hidrodinamica stratului fluidizat

Pentru a înţelege principiile acestei tehnici de lucru, se face următoarea experienţă: într-un tub de sticlă, avînd partea inferioară conică (pentru distribuţia uniformă) şi cu un ştuţ pentru introducerea agentului de fluidizare (fig. 191) — aerul, este prevăzut o placă poroasă pentru susţinerea stratului granular sau pulverulent. Se introduce, în tub, materialul granular care se dispune deasupra plăcii poroase, sub forma unui strat fix de înălţime z_0; prin partea inferioară a tubului se introduce gazul. Urmărind cu atenţie funcţionarea instalaţiei descrise, se observă anumite fenomene, cînd viteza gazului creşte.

La viteze mici, gazul se strecoară printre granulele stratului fără a le deplasa (figura 191, *a*), iar caracterizarea curgerii gazului (regimul de curgere, pierderea de presiune) se face conform ecuaţiilor stabilite la curgerea fluidelor prin straturi granulare fixe.

Crescînd viteza gazului, stratul rămîne fix însă creşte puţin în înălţime, pînă cînd, la o anumită viteză a gazului, forţa datorită frecării dintre gaz şi granulă devine egală cu greutatea granulei. *Începînd cu această viteză numită viteza iniţială de fluidizare*, particulele nu se mai sprijină una pe alta, ci sînt susţinute de către curentul de gaz, *stratul fix de granule trecînd în stare de strat fluidizat*. Stratul fluidizat are proprietăţi asemănătoare fluidelor. Astfel, stratul poate să curgă peste un deversor, suprafaţa sa este orizontală indiferent de înclinarea tubului de sticlă, exercită o presiune hidrostatică şi se poate vorbi chiar de viscozitatea stratului fluidizat.

Uneori în stratul fluidizat apar fenomene de pistonare şi de canalizare. Fenomenele de pistonare apar la valori mari ale raportului dintre înălţimea

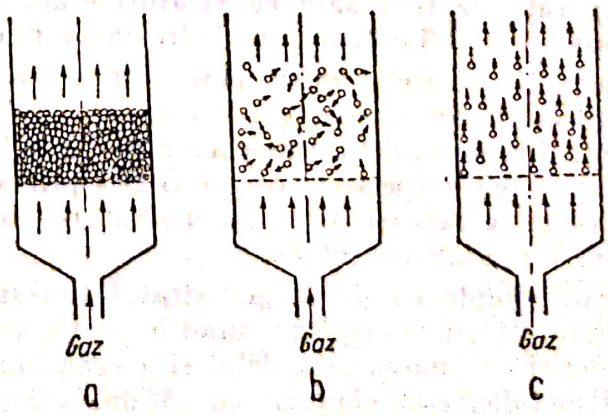


Fig. 191. Schema de principiu a fluidizării:
a — strat fix; *b* — strat fluidizat; *c* — transport pneumatic.

stratului și diametrul tubului și constau în deplasarea gazului prin strat sub forma unor bule mari de gaz (pistoane de gaz). Fenomenele de canalizare constau în curgerea gazului în strat prin anumite canale preferențiale cu rezistență la curgere mică.

La creșterea vitezei peste o anumită limită, granulele sînt antrenate în curentul de gaz, creîndu-se condiții pentru transportul pneumatic al stratului (figura 191, c).

Dacă în locul gazului se lucrează cu un lichid ca agent de fluidizare, se observă în ansamblu aceleași fenomene. Fluidizarea cu lichide este mai uniformă și se caracterizează prin lipsa fenomenelor de pistonare și prin atenuarea celor de canalizare.

b. Caracteristicile principale ale stratului fluidizat

Aplicarea din ce în ce mai largă a fluidizării, ca tehnică de lucru pentru intensificarea unor operații fizice și chimice din industria chimică și petrochimică, se datorează avantajelor deosebite ale acesteia ca urmare a unor caracteristici proprii stratului fluidizat. Uneori această tehnică de lucru, deși influențează favorabil intensificarea operațiilor și proceselor desfășurate în stratul fluidizat, este însoțită și de unele inconveniente, a căror influență negativă poate fi eliminată total prin soluții tehnologice bine alese.

Cele mai interesante caracteristici ale stratului fluidizat sînt cele dinamice, care se referă la comportarea sa asemănătoare cu a fluidelor (caracterul pseudofluid al stratului fluidizat) și amestecarea intensă a sistemului agent de fluidizare-granule solide. Datorită asemănării comportării stratului fluidizat cu un lichid, această tehnică de lucru duce la simplificarea aparaturii și permite transportul și dozarea continuă a sistemului fluid-solid respectiv. Datorită acestei caracteristici, aplicațiile industriale ale fluidizării reprezintă procese tehnologice automatizate, de productivitate și eficiență maximă.

Aparate de fluidizare

Aparatele de fluidizare se pot clasifica în trei tipuri principale:

1) aparate simple cu un singur strat fluidizat;
2) aparate de fluidizare cu straturi etajate;
3) aparate de fluidizare cu recircularea granulelor solide.

Această clasificare se referă mai mult la aspectul funcțional și mai puțin la aspectul constructiv, deoarece fiecare din cele trei tipuri principale se realizează într-o mare varietate de construcții specifice operațiilor care se desfășoară în aparatele respective; caracteristica principală a fiecărui timp rămîne însă întotdeauna aceeași: strat unic, straturi etajate, circulația interioară și exterioară a granulelor solide.

Aparate simple cu un singur strat fluidizat. Aceste aparate (fig. 192) sînt formate dintr-un recipient cilindric prevăzut cu patru deschideri pentru alimentarea și evacuarea granulelor și a agentului de fluidizare. Recipientul, de obicei metalic, este căptușit cu cărămidă refractară cînd se lucrează la

Scanned with OKEN Scanner

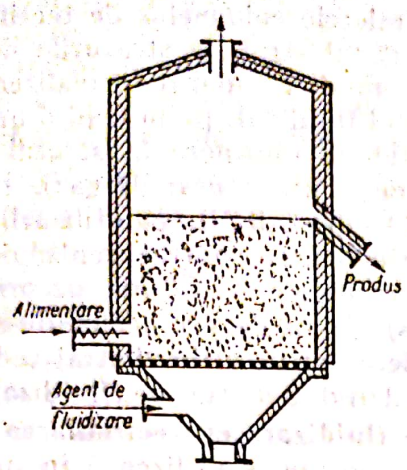


Fig. 192. Aparat cu un singur strat fluidizat.

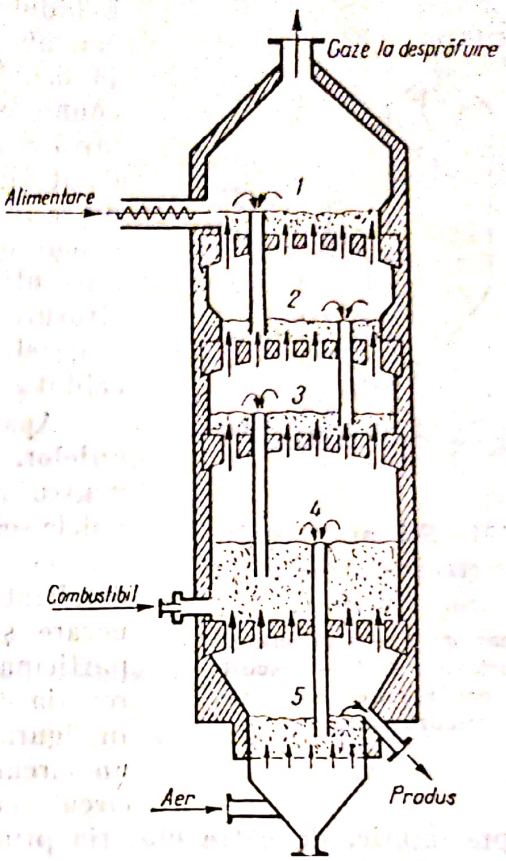


Fig. 193. Aparat etajat pentru arderea calcarului în strat fluidizat:
1, 2, 3 — straturi pentru preîncălzirea materialului; *4* — stratul de calcinare; *5* — stratul pentru răcirea materialului.

temperaturi ridicate. Alimentarea cu granule solide se face de obicei prin intermediul unui transportor melc, cu rol de dozator, iar evacuarea acestora din strat se face printr-un deversor situat în partea opusă deschiderii de alimentare. Stratul fluidizat este susținut de un grătar sau placă perforată care are, în același timp, și rolul de a repartiza uniform agentul de fluidizare.

Dacă este necesară încălzirea sau răcirea stratului, căldura este introdusă sau evacuată fie indirect prin țevi de încălzire sau răcire introduse în strat, fie direct prin arderea unui combustibil în strat sau prin introducerea de gaze sau lichide (apă) cu temperatură coborîtă; introducerea sau evacuarea căldurii din strat se poate realiza prin însăși granulele solide (purtător de căldură) și agentul de fluidizare.

Separarea pulberelor antrenate de gaz se face cu ajutorul cicloanelor, uneori montate chiar în interiorul aparatului de fluidizare; cînd este necesar un grad mare de separare, gazul de purificat trece în continuare prin scrubere, filtre cu saci sau filtre electrice.

Aparate cu straturi etajate. Aceste aparate au apărut din necesitatea găsirii unor soluții tehnice pentru a remedia inconvenientele stratului fluidizat referitoare la inegalitatea duratei de rămînere în strat și la imposibilitatea realizării contracurentului. Un asemenea aparat de fluidizare utilizat pentru arderea calcarului este schițat în figura 193. Acesta se caracterizează prin existența a patru straturi fluidizate, etajate, formate deasupra unor dispozitive de susținere speciale, rezistente, atît mecanic cît și termic. Granulele fine de calcar trec dintr-un strat în altul, de sus în jos, prin deversoare, ca și

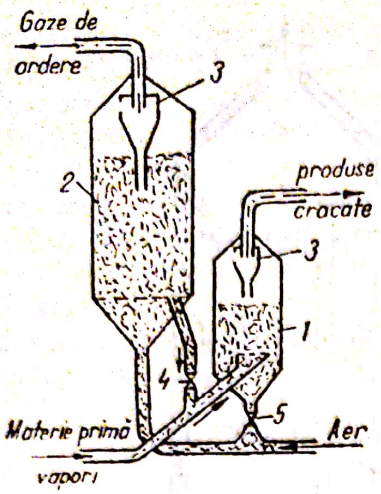


Fig. 194. Schema instalației de cracare catalitică în strat fluidizat:

1 — reactor; *2* — regenerator; *3* — cicloane; *4, 5* — dispozitive pentru reglarea circulației catalizatorului.

lichidul de pe talerele coloanelor de rectificare sau absorbție; gazul străbate straturile de jos în sus. În acest mod, în aparat se realizează o zonare a stratului fluidizat, permițînd o uniformizare a duratei de rămînere în stratul fluidizat (durata de contact granulă-gaz), creîndu-se în același timp posibilitatea utilizării contracurentului. Realizarea contracurentului permite utilizarea rațională a căldurii, pe primele straturi (de sus) granulele preîncălzindu-se de la gazele de ardere, iar pe ultimul strat cedează căldură preîncălzind agentul de fluidizare.

Aparate de fluidizare cu recircularea granulelor. Aceste aparate se utilizează în special pentru realizarea unor reacții catalitice, granulele solide avînd rol de catalizator și de purtător de căldură. Recircularea granulelor de catalizator este impusă de necesitatea de regenerare și reîncălzire a acestora după ce au participat — răcindu-se și inactivîndu-se — la reacția catalitică respectivă. Așa cum se arată în figura 194 granulele catalizatorului parcurg un circuit închis între reactor și regenerator, circulația exterioară fiind asigurată, prin transport pneumatic, de către materia primă (în stare de vapori) care intră în reactor și de către aerul necesar regenerării.

Instalația schițată în figura 194 se utilizează la cracarea catalitică în strat fluidizat a produselor petroliere. Deoarece, în urma reacției, pe suprafața granulelor se depune carbonul rezultat din cracarea hidrocarburilor, reîncălzirea granulelor are loc în regenerator în urma arderii cu aer, în strat fluidizat, a carbonului depus. Separarea granulelor de catalizator antrenate este asigurată prin trecerea gazului printr-o baterie de cicloane montată în interiorul fiecărui aparat.

6. CRISTALIZAREA ȘI SUBLIMAREA

Cristalizarea și sublimarea reprezintă operații unitare utilizate pentru separarea și purificarea substanțelor solide din soluții, topituri sau amestecuri solide.

a. Cristalizarea

Prin *cristalizare* se înțelege operația de separare a unui dizolvant solid din soluția sa suprasaturată, sau de separare a fazei solide rezultată prin solidificarea unei topituri. *Cristalizarea se utilizează atît la obținerea unor substanțe solide din soluțiile lor cît și ca metodă de purificare, ca operație dublă, dizolvare urmată de cristalizare.*

Separarea prin cristalizare se bazează pe solubilitatea limitată a substanţelor solide. Soluţiile suprasaturate sînt instabile: substanţa care depăşeşte concentraţia de saturaţie se separă în stare solidă, cristalizează, soluţia devenind astfel din nou saturată. *Soluţia saturată rămasă în urma separării cristalelor se numeşte* **soluţie mamă.**

Pentru realizarea operaţiei de cristalizare se utilizează următoarele procedee de suprasaturare a soluţiilor:

— *răcirea soluţiei*; acest procedeu se aplică pentru cristalizarea substanţelor a căror solubilitate se reduce mult prin coborîrea temperaturii şi pentru cristalizarea topiturilor;

— *îndepărtarea parţială a dizolvantului*; procedeul se aplică pentru substanţele a căror solubilitate nu este influenţată de temperatură. Îndepărtarea parţială a dizolvantului se poate realiza prin vaporizarea acestuia (transformarea în vapori la temperaturi şi presiuni de vapori inferioare celor de saturaţie) sau prin evaporare (fierbere la temperatura corespunzătoare presiunii totale); evaporarea poate avea loc la presiune atmosferică sau sub vid;

— *îndepărtarea parţială a dizolvantului*, însoţită de răcirea soluţiei.

Tipuri principale de cristalizoare

Cele mai simple aparate de cristalizare sînt cuvele de cristalizare — vase descoperite de formă paralelipipedică. Cristalizarea se produce datorită răcirii libere a soluţiei, precum şi vaporizării unei părţi din dizolvant în aerul înconjurător. Pentru favorizarea centrelor de cristalizare în cuva de cirstalizare se introduc sîrme sau benzi metalice sau din lemn; majoritatea cristalelor formate se depun pe aceste corpuri introduse în soluţie, iar impurităţile sedimentează la baza cuvei. Aceste aparate funcţionează discontinuu şi necesită manoperă multă pentru evacuarea cristalelor şi soluţiei mamă.

Cristalizoarele moderne folosesc răcirea cu convecţie forţată, *utilizînd apa şi aerul ca agent de răcire*, sau funcţionează prin evaporarea dizolvantului sub *vid*.

Cristalizoare cu răcire cu apă. Răcirea soluţiei în aceste cristalizoare se realizează indirect prin mantaua recipientului, sau prin serpentine interioare; unele cristalizoare sînt prevăzute cu un răcitor exterior prin care soluţia circulă, în circuit închis, între răcitor şi cristalizator.

În figura 195 este reprezentată schiţa unui cristalizator cu răcitor exterior. În acest aparat, suprasaturarea soluţiei are loc, datorită răcirii, în răcitor, iar cristalizarea, în vasul de cristalizare. Soluţia iniţială se alimentează în vasul de cristalizare, de unde este recirculată cu o pompă prin răcitorul tubular de unde revine, ca soluţie suprasaturată, printr-o conductă centrală, pînă aproape de baza vasului de cristalizare. Cristalele formate în vasul de cristalizare circulă împreună cu soluţia pînă cînd viteza lor de sedimentare devine mai mare decît viteza soluţiei; în acest mod în vasul de cristalizare are loc şi o clasare după mărimea cristalelor formate. Dimensiunile cristalelor se reglează prin variaţia intensităţii de răcire a soluţiei în răcitor şi prin variaţia vitezei soluţiei; cristalele mărunte care se ridică la suprafaţa soluţiei din vasul de cristalizare sînt reţinute de un separator de cristale. Acest aparat funcţionează atît periodic cît şi continuu.

Scanned with OKEN Scanner

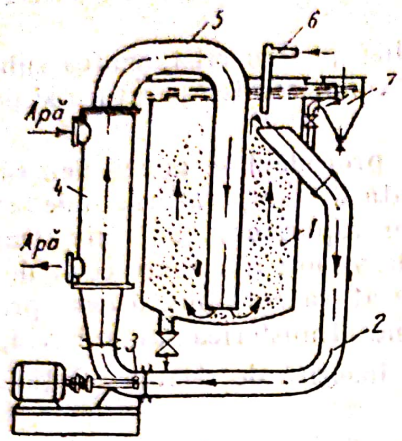


Fig. 195. Cristalizor cu răcitor exterior:

1 — vas de cristalizare; *2, 5* — conducte pentru circulația soluției; *3* — pompă de recirculație; *4* — răcitor tubular; *6* — alimentarea cu soluție; *7* — separator de cristale mici.

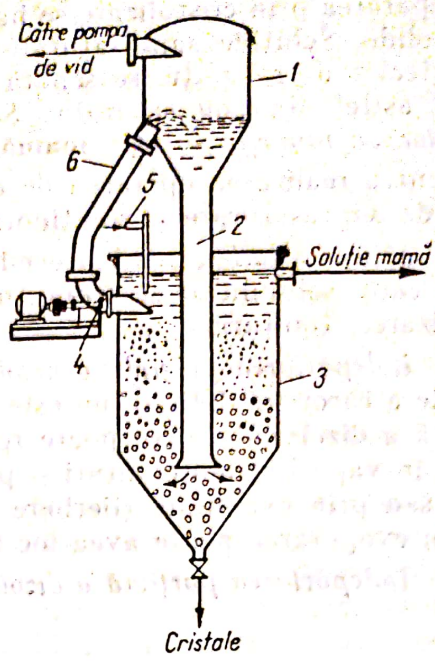


Fig. 196. Cristalizator cu evaporare în vid:

1 — evaporator; *2* — conductă barometrică; *3* — vas de cristalizare; *4* — pompă de recirculație; *5* — alimentarea soluției; *6* — conductă de recirculație.

Cristalizoare cu evaporare în vid. Folosirea vidului în operația de cristalizare are drept scop coborîrea temperaturii de evaporare a soluției și, prin urmare, și a temperaturii de cristalizare.

Aparatul schițat în figura 196 reprezintă un cristalizor cu evaporare în vid cu funcționare continuă, format dintr-un evaporator situat deasupra vasului de cristalizare, de formă cilindrică prevăzut cu fund conic; evaporatorul este legat de vasul de cristalizare printr-o conductă exterioară de recirculație a soluției și printr-o conductă barometrică interioară care pătrunde în soluția de cristalizat pînă aproape de partea conică a vasului de cristalizare. Soluția alimentată în vasul de cristalizare este pompată împreună cu o parte din soluția mamă în evaporatorul de unde, soluția suprasaturată, ca urmare a evaporării și răcirii, coboară prin conducta barometrică în vasul de cristalizare. Aici cristalele depuse sedimentează și sînt evacuate pe la partea inferioară a cristalizorului; soluția mamă, care deversează în partea superioară a cristalizorului, se evacuează cu o pompă. Depresiunea necesară în cristalizor se asigură cu o pompă de vid sau cu un ejector. De multe ori, în industrie, cristalizarea sub vid se realizează în instalații cu mai multe corpuri, asemănătoare instalațiilor de evaporare cu efect multiplu.

Scanned with OKEN Scanner

b. Sublimarea

Sublimarea *este o operaţie de separare şi purificare a substanţelor solide, prin trecerea acestora din stare solidă direct în stare gazoasă; operaţia inversă de trecere directă din stare gazoasă în stare solidă, se numeşte* **desublimare.** Produsul obţinut din operaţia de sublimare se numeşte **sublimat.**

Realizarea operaţiei constă în încălzirea amestecului solid ce urmează a fi separat sau purificat, sublimarea substanţelor de separat, datorită creşterii tensiunii lor de vapori şi în răcirea gazelor rezultate —| desublimarea — în vederea obţinerii sublimatului în stare solidă. Desublimarea se realizează prin trecerea gazului într-o cameră răcită, numită cameră de condensare; substanţele solide din amestecul iniţial avînd tensiuni de vapori mai mici decît sublimatul au rămas în stare solidă iniţială, separîndu-se astfel de sublimat.

Pentru realizarea operaţiei de sublimare-desublimare se utilizează următoarele procedee generale:

— *Sublimarea simplă,* cînd faza gazoasă a sistemului nu mai conţine şi alte gaze sau vapori în amestec; acest procedeu se realizează de obicei sub vid;

— *sublimarea cu antrenant,* cînd faza gazoasă reprezintă un amestec de sublimat gazos şi un gaz antrenant. Gazul antrenant scade presiunea parţială a sublimatului gazos şi reduce, astfel, temperatura de sublimare. Ca antrenant se folosesc: azotul, bioxidul de carbon, vaporii de apă;

— *sublimarea fracţionată,* urmată de desublimarea fracţionată, urmăreşte separarea unor amestecuri solide volatile şi constă în creşterea treptată a temperaturii de sublimare şi în scăderea succesivă a temperaturii de desublimare.

Utilaje pentru sublimare. Instalaţia de realizare a sublimării, ca operaţie dublă — sublimare-desublimare — necesită două utilaje principale: *de încălzire pentru sublimare* (transformarea solid-gaz), numit blaz de sublimare, şi *de răcire pentru desublimare* (transformarea inversă, gaz-solid) — camera de condensare răcită cu apă sau aer.

În figura 197 este *schiţată o instalaţie pentru sublimarea simplă,* formată din cele două utilaje principale — blazul de sublimare şi camera de condensare — unite printr-o conductă pentru circulaţia sublimatului gazos. Blazul de sublimare este încălzit cu o baie de ulei; materialul solid supus sublimării

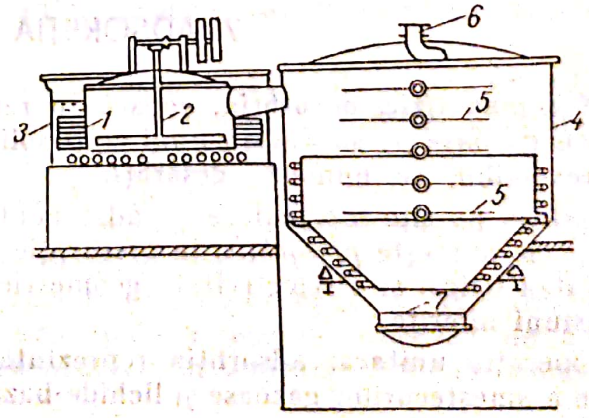


Fig. 197. Instalaţie pentru sublimare simplă:

1 — blaz de sublimare; *2* — amestecător; *3* — baie de ulei; *4* — cameră de condensare; *5* — plăci de depunerea sublimatului; *6* — legătură la pompa de vid; *7* — evacuarea sublimatului.

Scanned with OKEN Scanner

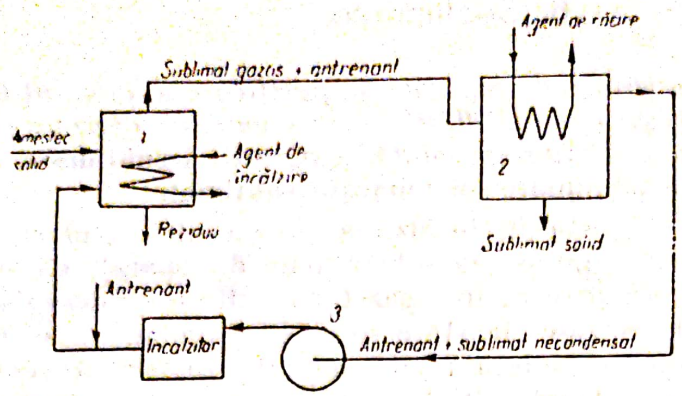


Fig. 198. Schema instalației de sublimare cu antrenant: *1* — blaz de sublimare; *2* — cameră de condensare; *3* — pompă de recirculație.

este amestecat pentru a se asigura o încălzire uniformă. Camera de condensare este prevăzută cu niște plăci orizontale pentru depunerea cristalelor rezultate în urma desublimării, din cînd în cînd aceste plăci sînt rotite cu un dispozitiv special, pînă la verticală, iar cristalele depuse cad și sînt colectate la baza camerei. Depresiunea necesară este asigurată de către o pompă de vid.

Schema unei instalații de sublimare cu antrenant în circuit închis este reprezentată în figura 198. Antrenantul, încălzit în prealabil, străbate stratul de material solid care, în urma încălzirii (are loc și o încălzire indirectă a blazului), sublimează. Sublimatul gazos împreună cu antrenantul ajung în camera de condensare, în care cea mai mare parte din sublimatul gazos trece, în urma răcirii, în stare solidă (desublimează); restul gazului este recirculat împreună cu antrenantul, cu ajutorul unei pompe de recirculație. Înainte de a intra în blazul de sublimare, amestecul gazos este încălzit într-un schimbător de căldură. O asemenea instalație poate funcționa periodic sau continuu, după necesități.

Verificarea cunoștințelor

1. Ce este cristalizarea?
2. Comparați constructiv și funcțional tipurile de cristalizatoare industriale cunoscute
3. Care sînt procedeele de realizare a operației de sublimare?

7. ADSORBȚIA

Ca fenomen fizic, **adsorbția,** constă în reținerea unor substanțe solide, lichide sau gazoase pe suprafața unui corp solid numit **adsorbent;** fenomenul invers, reversibil, se numește **desorbție.**

Adsorbția pe site moleculare — adsorbenții, cu structuri cristaline bine definite — se numește *presorbție*; la presorbție, adsorbenții prezintă, pe lîngă selectivitatea fizică, și o selectivitate geometrică față de moleculele de forme și dimensiuni diferite.

Ca operație unitară, adsorbția reprezintă o operație de separare sau purificare a amestecurilor gazoase și lichide bazată pe selectivitatea adsorben-

tului față de componentele amestecului și de reversibilitatea fenomenului fizic de bază — desorbția. Această operație decurge în două etape principale: în prima etapă, de adsorbție, adsorbentul reține pe suprafața sa una sau mai multe componente — adsorbatul — din amestecul inițial supus separării sau purificării; în cea de-a doua etapă, de desorbție, adsorbentul pune în libertate componentele adsorbite. După desorbție, adsorbentul este din nou folosit pentru adsorbție; uneori, periodic sau continuu, adsorbentul, după desorbție este reactivat sau regenerat. În industria chimică și petrochimică adsorbția este o operație aplicată pe scară largă pentru purificarea și uscarea gazelor, pentru separarea unor amestecuri de gaze cum sînt separarea gazolinei din gazele de sondă, sau pentru recuperarea unor solvenți volatili.

Adsorbenții utilizați în industrie pentru realizarea operației de adsorbție sînt substanțe solide cu o mare suprafață specifică, datorită porozității lor ridicate. Dintre adsorbenți o mare importanță tehnică o au în special cărbunele activ, gelul de silice (silicagelul), pămînturile decolorante, alumina activă etc. O deosebită importanță au căpătat în ultimul timp pentru adsorbție *sitele moleculare*. Acestea sînt niște aluminosilicați de sinteză posedînd o rețea cristalină de tetraedri de SiO_2 și Al_2O_3 care delimitează cavități interioare comunicînd între ele prin pori egali, de mărime bine definită.

a. Procedee de absorbție

Pentru realizarea operației de adsorbție, se utilizează mai multe procedee: *adsorbția statică*, *adsorbția dinamică*, *adsorbția continuă* și *hipersorbția* care poate fi considerată ca o variantă a adsorbției continue.

Adsorbția statică se realizează prin introducerea adsorbentului, sub formă de praf sau granule fine, în fluidul care conține substanța ce trebuie adsorbită. După terminarea operației, adsorbentul este separat prin filtrare sau sedimentare, trece la desorbție (regenerare), după care poate fi reintrodus în circuit. O importanță deosebită în adsorbția statică o are amestecarea materialului cu lichidul supus separării sau purificării.

Adsorbția dinamică se realizează prin trecerea fluidului de separat sau purificat printr-un strat de material adsorbant granular. Adsorbția dinamică, deși se poate utiliza și pentru adsorbția din lichide, se aplică în special pentru absorbția gazelor; se realizează în unul sau mai multe adsorbere care trece succesiv prin cele trei etape principale: adsorbția (reținerea adsorbantului de către adsorbent), desorbția substanței adsorbite sau regenerarea absorbentului și răcirea adsorbentului.

În figura 199 este reprezentată schema unei instalații cu două adsorbere, cu funcționare pseudocontinuă, pentru realizarea adsorbției dinamice, utilizată pentru adsorbția hidrocarburilor din gaze.

Adsorbția continuă se realizează prin circulația atît a amestecului gazos cît și a adsorbentului; circulația continuă a amestecului gazos și a adsorbentului se poate realiza în contracurent în regim staționar, în instalații tip coloană sau în instalații cu adsorber rotativ cu funcționare continuă în regim pseudostaționar. Caracteristica principală a acestui procedeu de adsorbție constă în aceea că, atît adsorbentul cît și amestecul circulă continuu în instalație.

Scanned with OKEN Scanner

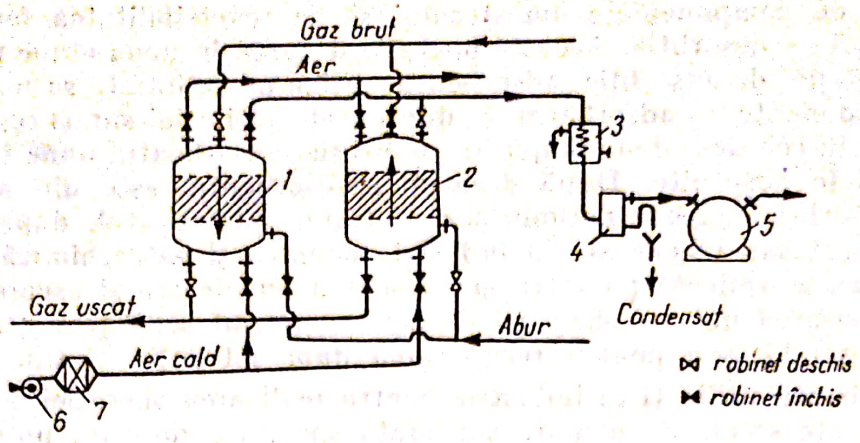


Fig. 199. Instalaţie de adsorbţie cu funcţionare pseudocontinuă:
1, 2 — absorbere; *3* — condensator; *4* — separator; *5* — rezervor de hidrocarburi; *6* — suflantă; *7* — calorifer pentru încălzirea aerului.

Hipersorbţia reprezintă tot o adsorbţie continuă, îmbunătăţită prin recircularea în coloană de hipersorbţie a unei părţi din adsorbantul pur, în calitate de reflux. Acest procedeu modern de adsorbţie se foloseşte la separarea amestecurilor sau de vapori în componentele lor pure, datorită rectificării continue a adsorbantului.

b. Utilaje şi instalaţii de adsorbţie

Pentru realizarea adsorbţiei dinamice se utilizează adsorbere verticale şi adsorbere cu strat cilindric de material adsorbent. Schiţa unui adsorber vertical cu cărbune activ este prezentată în figura 200. În acest adsorber, stratul de adsorbent este aşezat pe un grătar de susţinere. Desorbţia şi regenerarea se realizează cu abur, care se introduce printr-o conductă de distribuţie găurită, situată sub stratul de material; prin aceeaşi conductă se introduce şi aerul necesar uscării şi răcirii stratului de adsorbent.

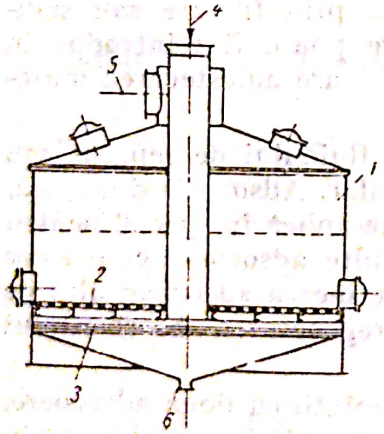


Fig. 200. Adsorber vertical cu cărbune activ:
1 — corpul adsorberului; *2* — grătar pentru susţinerea stratului; *3* — ţeavă găurită pentru distribuţia aburului şi a aerului; *4* — intrarea amestecului gazos; *5* — ieşirea gazelor neadsorbite; *6* — evacuarea umidităţii.

Asemenea adsorber trece succesiv prin cele trei etape într-o funcţionare discontinuă.

În construcţiile moderne de adsorbere, stratul de material este dispus între doi cilindri coaxiali perforaţi, în interiorul unui recipient vertical. Un asemenea adsorber cu strat cilindric de cărbune activ este schiţat în figura 201. În aceste construcţii, stratul de adsorbent nu mai este străbătut în lungime de către amestecul gazos de separat, ci radial, în direcţie aproape orizontală. În acest mod, deoarece aria secţiunii de trecere a gazului este mult mai mare

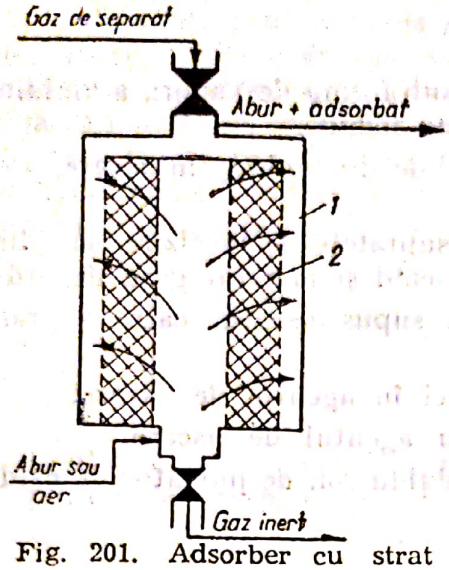


Fig. 201. Adsorber cu strat cilindric de adsorbent:
1 — corpul adsorberului; *2* — stratul de adsorbent.

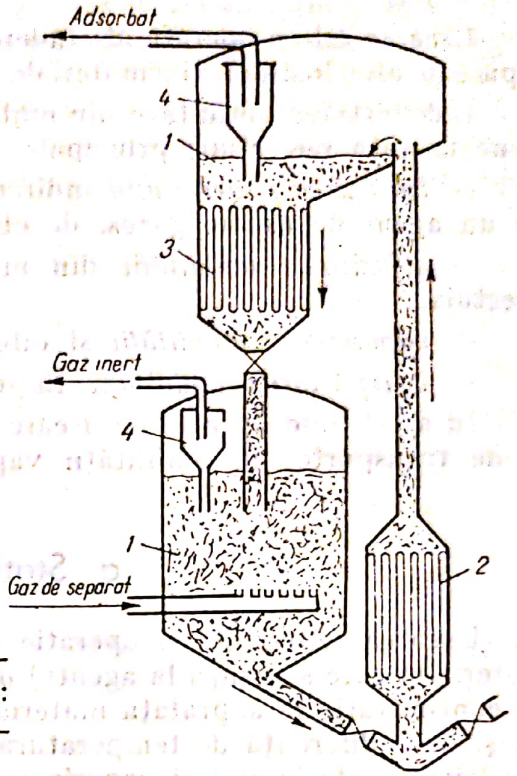


Fig. 202. Instalație de adsorbție continuă în strat fluidizat:
1 — adsorber; *2* — desorber; *3* — răcitor; *4* — cicloane.

decît aria secțiunii transversale, se realizează trecerea unor debite mari de gaz la viteze mici de circulație.

Atît adsorberele cu strat cilindric, cît și adsorberele verticale, se utilizează în instalații cu două sau trei aparate montate în paralel, trecînd succesiv prin etapele adsorbției.

Adsorbția continuă se realizează, în general, în instalații formate din adsorbere cu strat mobil sau strat fluidizat de adsorbent.

În figura 202 este prezentată schița unei instalații de adsorbție continuă în strat fluidizat. Fluidizarea adsorbentului se realizează chiar cu amestecul gazos care urmează să fie separat. Adsorbentul, desorbit într-un desorber, tot în strat fluidizat, este transportat pneumatic, cu ajutorul componentelor desorbite, la partea superioară a instalației într-un recipient cu secțiune mare, unde are loc separarea granulelor antrenate; adsorbatul este trecut în continuare printr-un ciclon pentru separarea pulberii fine de adsorbent antrenate. Adsorbentul este după aceea răcit și, prin cădere liberă, este reintrodus din nou în adsorberul cu strat fluidizat.

Verificarea cunoștințelor

1. Dați cîteva exemple de aplicare a operației de adsorbție.
2. Ce sînt adsorbenții (exemple); cum se caracterizează?
3. Faceți o comparație între procedeele de adsorbție.
4. Ce este hipersorbția?

Scanned with OKEN Scanner

8. USCAREA

Uscarea este o operație de îndepărtare, sub formă de vapori, a umidității (apă sau alte lichide) din materiale solide sau lichide.

Îndepărtarea umidității din materiale solide și lichide, prin uscare, presupune următoarele etape principale:

— *încălzirea materialului* indirect, prin suprafețe de încălzire, sau direct cu un agent de uscare gazos, de obicei aer cald și mai rar gaze de ardere;

— *difuziunea umidității* din materialul supus uscării, către suprafața acestuia;

— *vaporizarea umidității* și difuziunea ei în agentul de uscare;

— *îndepărtarea umidității* împreună cu agentul de uscare.

În acest mod agentul de uscare are un dublu rol: de purtător de căldură și de transportor al umidității vaporizate.

a. Statica uscării

Uscarea reprezintă o operație de transfer de masă (umiditatea) de la materialul care se usucă la agentul de uscare, condiționată atît de o diferență de concentrație la suprafața materialului și în interiorul agentului de uscare cît și de o diferență de temperatură necesară transferului de căldură pentru încălzirea materialului și vaporizarea umidității. Deoarece, atît în laborator cît și în industrie, agentul de uscare cel mai răspîndit este aerul, s-au stabilit cîțiva parametri specifici referitori la aerul umed, adică un amestec de aer uscat cu vapori; acești parametri intervin foarte des atît în calculul operației de uscare cît și în conducerea și urmărirea modului de desfășurare a acesteia.

1) Aerul umed

Aerul umed reprezintă un amestec de aer uscat și vapori de apă. Deoarece în aerul nesaturat umezeala se găsește sub formă de vapori supraîncălziți, proprietățile aerului umed se definesc cu ajutorul legilor gazelor ideale. Presiunea totală a aerului umed se notează cu p și se exprimă în mm Hg, iar presiunea parțială a vaporilor de apă cu p_v și se exprimă în aceleași unități; presiunea parțială maximă a vaporilor de apă în aerul umed, notată cu p_s, este egală cu presiunea vaporilor de apă la temperatura la care se găsește amestecul. Se definește drept *umezeală relativă* a aerului, sau *stare higrometrică*, mărimea φ reprezentînd raportul:

$$\boxed{\varphi = \frac{p_v}{p_s},} \qquad (190)$$

a cărui valoare maximă este $\varphi = 1$ corespunzătoare -aerului saturat în vapor de apă.

Starea higrometrică se dă uneori și în procente: în acest caz relația (190) se înmulțește cu 100.

Scanned with OKEN Scanner

Se defineşte *conţinutul de umezeală al aerului*, notat cu x, ca raportul dintre masa vaporilor de apă şi masa de aer uscat din amestecul de aer umed considerat; unităţile de măsură pentru conţinutul de umezeală x sînt kg/kg. Valoarea maximă a conţinutului de umezeală, corespunzătoare aerului saturat cu vapori de apă, se numeşte conţinut maxim de umezeală şi se notează cu x_s. Raportul dintre conţinutul de umezeală x şi valoarea maximă x_s, pentru temperatura la care se găseşte amestecul, defineşte *gradul de saturare* ψ al aerului umed:

$$\psi = \frac{x}{x_s}. \tag{191}$$

Conţinutul de umezeală x se calculează în funcţie de presiunea parţială a vaporilor de apă p_v şi de presiunea totală p, cu ajutorul relaţiei:

$$x = 0{,}622 \frac{p_v}{p - p_v}. \tag{192}$$

Dacă se cunoaşte umezeala relativă φ şi presiunea de vapori la temperatura la care se găseşte amestecul, se poate înlocui $p_v = \varphi \cdot p_s$ şi relaţia (192) ia forma:

$$x = 0{,}622 \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s}. \tag{193}$$

Conţinutul maxim de umezeală (de saturaţie) se calculează cu ecuaţia (192) în care se înlocuieşte presiunea parţială p_v cu presiunea de saturaţie a vaporilor p_s, sau cu ecuaţia (193) considerînd pentru aerul saturat $\varphi = 1$. Pentru utilizarea aerului umed ca purtător de căldură, este necesar să se cunoască valoarea entalpiei sale ca funcţie atît de temperatură cît şi de conţinutul de umezeală x. Entalpia aerului I se raportează la $(1 + x)$ kg aer umed şi se calculează cu relaţiile:

$$I = t + x\,(2\,500 + 2\,t), \text{ în KJ/}(1 + x)\text{ kg} \tag{194}$$

$$I = 0{,}24\,t + x\,(597 + 0{,}47\,t), \text{ în kcal/}(1 + x)\text{ kg} \tag{195}$$

Pentru calculul operaţiei de uscare se utilizează mai rar expresiile analitice, lucrîndu-se de obicei cu diagrama I, x, numită diagrama lui Ramzin, cu ajutorul căreia se determină grafic interdependenţa dintre parametrii aerului umed: I, x, x_s, t, φ, cînd sînt cunoscute valorile mărimilor a doi parametri.

2) Bilanţul de materiale pentru operaţia de uscare

Se consideră schema simplificată a unui uscător, ca în figura 203, în care materialul umed G_1 este uscat direct cu aerul L_1; în funcţie de modul de desfăşurare a operaţiei (continuu sau periodic), mărimile G_1 şi L_1 pot reprezenta debite sau cantităţi. La sfîrşitul operaţiei, materialul de uscat şi aerul sînt reprezentate de mărimile G_2 şi L_2. Se poate considera că debitul (sau cantitatea) G_1 este format din debitul (sau cantitatea) de material uscat (anhidru) G şi debitul (sau cantitatea) de umiditate U_1; în mod analog G_2 reprezintă suma

Scanned with OKEN Scanner

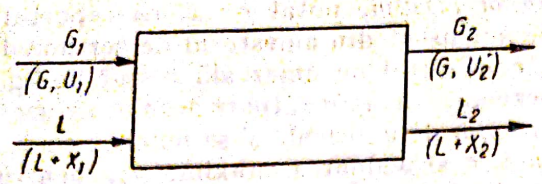


Fig. 203. Schema de principiu pentru deducerea bilanțului de materiale la uscare.

valorilor G și U_2. Debitul (sau cantitatea) de aer inițial L_1 poate fi considerat ca fiind format din debitul (sau cantitatea) de aer uscat L și debitul (sau cantitatea) de umezeală X_1; în mod analog L_2 reprezintă suma valorilor L și X_2. Ținînd seama de aceste notații și de schema din figura 203, se pot scrie următoarele ecuații de bilanț total:

$$G_1+L_1=G_2+L_2 \tag{196}$$

și de bilanț parțial al apei:

$$U_1+X_1=U_2+X_2 \tag{197}$$

Notînd cu $U=U_1-U_2$, debitul (sau cantitatea de umiditate îndepărtată, prin uscare, din material), ecuația (197) se poate scrie sub forma:

$$U=X_2-X_1=L(x_2-x_1), \tag{198}$$

în care x_1 și x_2 reprezintă conținutul de umezeală al aerului la intrare și, respectiv, la ieșire din uscător. Împărțind relația (198) cu U și notînd cu l consumul specific de aer, reprezentînd cantitatea de aer uscat necesară pentru a îndepărta din material un kg de umiditate, $l=U/L$, se obține:

$$\boxed{l=\frac{1}{x_2-x_1}.} \tag{199}$$

Dacă materialul supus uscării are umiditatea u_1 iar în urma uscării ajunge la umiditatea u_2 (exprimate în procente masice), bilanțul parțial al materialului uscat (anhidru) se exprimă prin relația:

$$\boxed{G=G_1\frac{100-u_1}{100}=G_2\frac{100-u_2}{100}.} \tag{200}$$

b. Tipuri principale de uscătoare

Construcția utilajelor pentru realizarea operației de uscare, numite *uscătoare*, urmărește asigurarea unor condiții optime pentru desfășurarea operației, înțelegînd prin aceasta atît condițiile necesare mărimii vitezei de uscare, cît și condițiile unei uscări raționale din punct de vedere tehnologic și economic, de menajare a materialului supus uscării și de reducere a consumului de căldură și de aer de uscare.

Scanned with OKEN Scanner

1) Uscătoare cameră

Aceste uscătoare sînt încăperi de formă paralelipipedică, de la mărimea unui dulap pînă la mărimea unei camere, în care materialul, dispus pe polițe sau încărcat pe cărucioare, nu se află în stare de mișcare; aceste uscătoare funcționează discontinuu, la presiune atmosferică. Încărcarea și descărcarea materialului se face prin ușile camerei de uscare. Aerul de uscare circulă paralel cu suprafața materialului sau străbate stratul de material. Circulația aerului prin uscător poate fi naturală, datorită tirajului unui coș, sau forțată, realizîndu-se cu ajutorul unor ventilatoare care pompează aerul peste calorifere, în uscător. Mai utilizate sînt uscătoarele cameră cu încălzire intermediară a aerului și cu recirculație parțială reprezentate în figurile 204 și 205. În uscătorul cameră din figura 204, aerul se încălzește mai întîi într-un calorifer exterior *1*, după care este dirijat de către ventilatorul *2* la baza uscătorului cameră, unde curge paralel cu materialul dispus în stive așezate pe cărucioare pe care îl usucă; după ce a uscat materialul dispus în treimea inferioară a uscătorului, aerul este din nou încălzit prin trecerea peste țevile unui calorifer interior *5*, trecînd apoi peste materialul dispus în treimea de mijloc a uscătorului; după încă o încălzire intermediară *6*, aerul usucă materialul din partea superioară a uscătorului, după care părăsește uscătorul.

În uscătorul din figura 205 aerul este încălzit o singură dată înainte de a intra în camera de uscare, însă înainte de încălzire se amestecă cu o parte din aerul care a trecut prin uscător.

Recircularea parțială a aerului prezintă avantaje legate de mărirea vitezei de circulație a aerului (intensificarea operației), de utilizarea mai economică a aerului și a căldurii și de protejarea materialului de uscat.

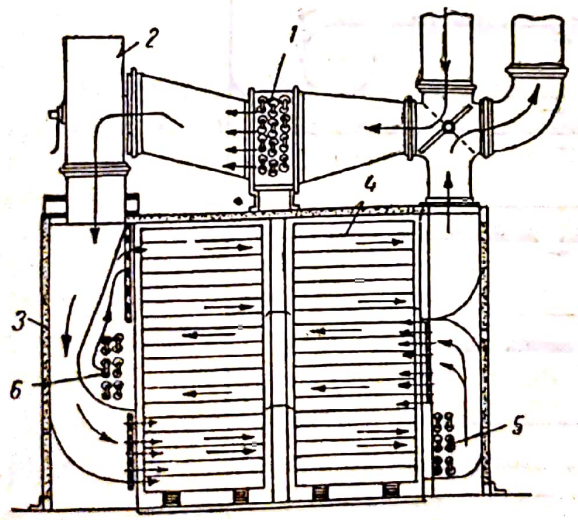


Fig. 204. Uscător cameră cu încălzirea ieșire electric.

1, 5, 6 — calorifere pentru încălzirea aerului; *2* — ventilator; *3* — cameră de uscare; *4* — cărucioare.

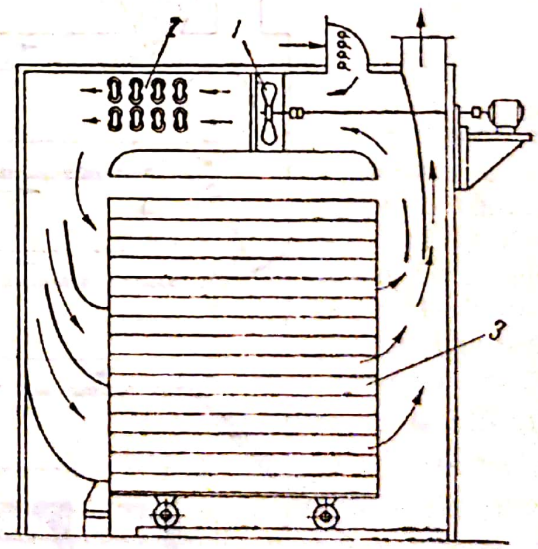


Fig. 205. Uscător cameră cu recircularea parțială a aerului:

1 — ventilator; *2* — calorifer; *3* — cărucior.

Scanned with OKEN Scanner

Uscătoarele cameră se utilizează în general pentru uscarea intermitentă a unor cantităţi mici de material. Principalele lor neajunsuri sînt: durata mare de uscare, pierderi de căldură la încărcare şi descărcare, uscare neuniformă, manoperă multă, control dificil, consum mare de energie, lipsa circulaţiei materialului.

2) Uscătoare cu bandă

Uscătoarele din această categorie constau dintr-o cameră în interiorul căreia materialul supus uscării, dispus pe una sau mai multe benzi transportoare, se deplasează în curent paralel, contracurent sau în curent încrucişat cu agentul de uscare, de obicei aer cald.

În uscătorul cu bandă din figura 206 materialul supus uscării, alimentat pe la partea superioară, parcurge succesiv, în cascadă, patru benzi transportoare, circulînd în contracurent cu aerul de uscare încălzit în caloriferul de la baza camerei; trecînd de pe o bandă pe alta, materialul se amestecă, reînnoind de mai multe ori suprafaţa de contact cu agentul de uscare, ceea ce duce la uscarea sa uniformă.

Uscătoarele cu bandă sînt folosite la uscarea pastelor şi a materialelor granulare şi fibroase. O variantă a uscătoarelor cu bandă, caracterizată printr-o mare productivitate, o constituie uscătoarele cu falduri, utilizate pentru uscarea pastelor (fig. 207). În aceste uscătoare, materialul supus uscării, sub formă de pastă, este presat în ochiurile adînci ale plasei metalice, care constituie o bandă transportoare fără şfîrşit. Faldurile se formează ca

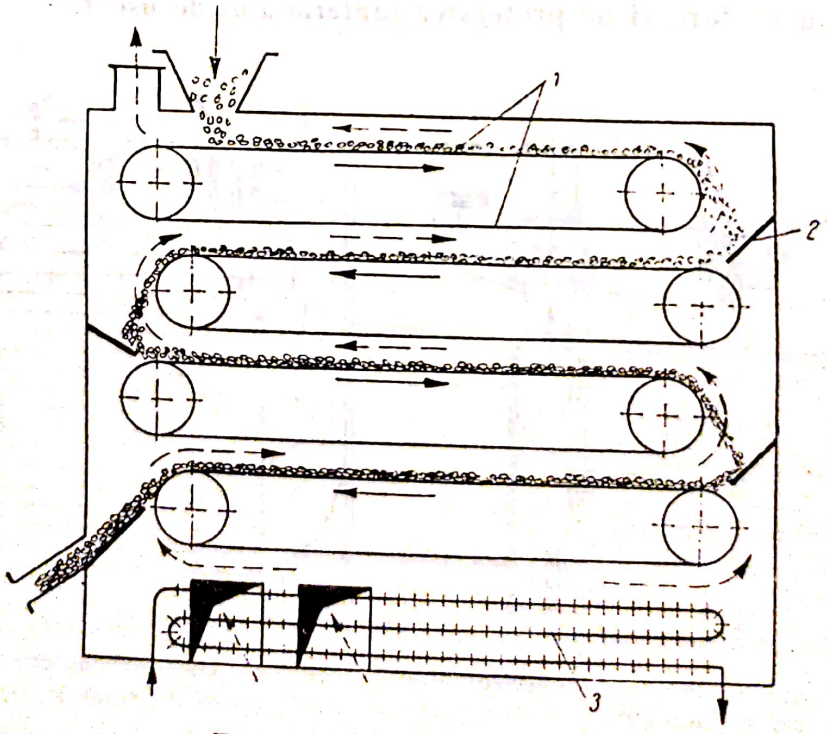


Fig. 206. Uscător cu bandă:
1 — benzi transportoare; *2* — table pentru dirijarea curentului de aer; *3* — calorifer.

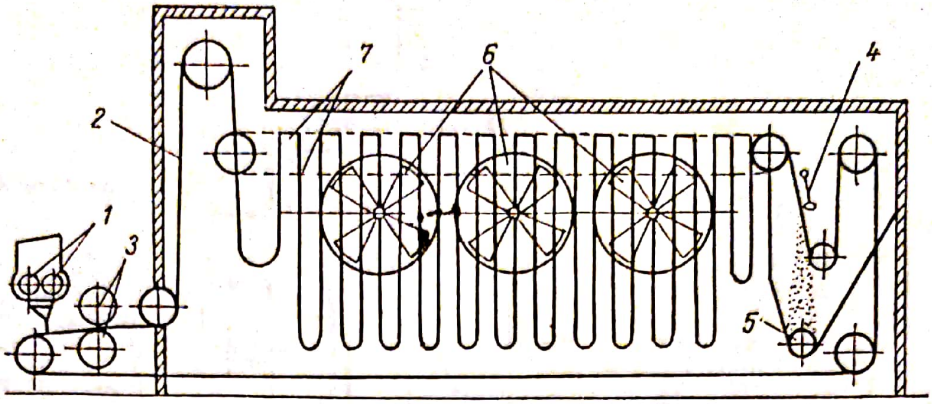


Fig. 207. Uscător cu falduri:
1 — alimentarea cu material; *2* — plasă purtătoare de materiale; *3* — valțuri de presare; *4* — dispozitiv de scuturare; *5* — transportor melcat; *6* — ventilatoare; *7* — lanțuri transportoare.

urmare a sprijinirii plasei, prin niște tije cuprinse în plasă și depășind lățimea acesteia, pe două lanțuri transportoare, care se deplasează cu viteză mică, situate la partea superioară a uscătorului. Aerul de uscare este suflat de niște ventilatoare *6*, transversal pe direcția de deplasare a plasei cu material. Desprinderea materialului uscat din ochiurile plasei se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de scuturare *4* și prin trecerea peste un rulou cu raza mică; materialul uscat este evacuat cu un transportor melc *5*.

Uscătoarele cu falduri au intensitate de uscare și productivitate mare datorită măririi suprafeței de uscare a materialului, grosimii reduse a stratului de material și încălzirii suplimentare de la împletitura metalică a plasei purtătoare.

3) Uscătoare cu tambur

Uscătoarele din această categorie (fig. 208) constau dintr-un tambur cilindric *3*, înclinat, prevăzut cu o coroană dințată pentru acționare 4, cu două sau mai multe bandaje *5* și role *6* care asigură sprijinirea în timpul rotirii. Materialul supus uscării se alimentează în uscător prin capătul mai ridicat al tamburului și se usucă prin contactul direct cu gazele de ardere produse într-un focar special realizat în acest scop. Deplasarea materialului în lungul uscătorului se datorește atît rotației și acțiunii unor palete elicoidale și șicane montate în interiorul tamburului, cît și înclinării acestuia cu un unghi de aproximativ 6° față de orizontală. Șicanele interioare *9*, de diferite forme, au rolul de a evita mărunțirea materialului în timpul transportului prin uscător. Etanșarea între tamburul rotativ și cele două capete fixe prin care se introduc și se evacuează materialul și agentul de uscare se realizează prin materiale speciale de fricțiune sau, mai des, prin dispozitive cu labirinți. Pentru a menține în uscător o presiune cît mai apropiată de cea atmosferică, circulația agentului de uscare este ajutată de acțiunea unui exhaustor montat după ciclonul de desprăfuire.

Scanned with OKEN Scanner

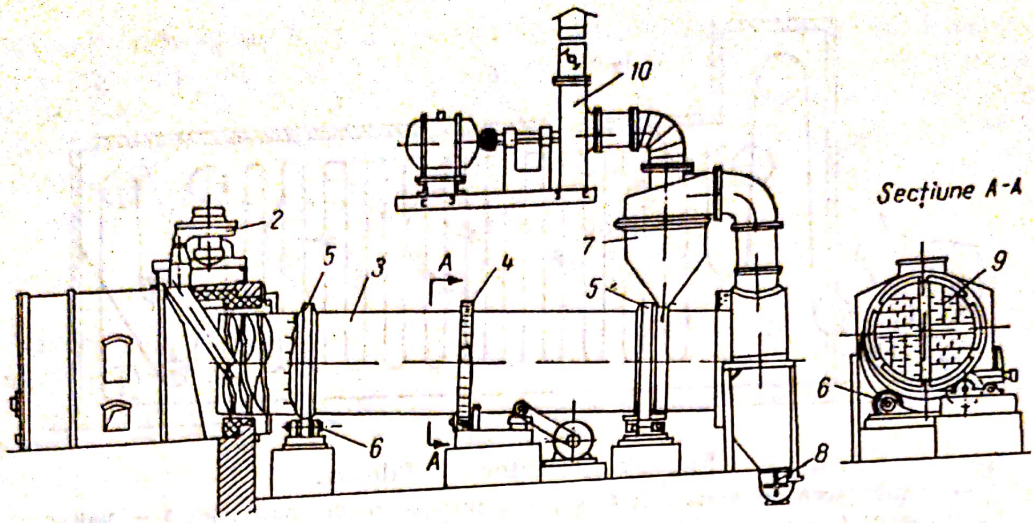


Fig. 208. Uscător cu tambur:

1 — focar; *2* — alimentator; *3* — tambur; *4* — coroană de acționare; *5* — bandaje; *6* — role de sprijin; *7* — ciclon; *8* — transportor melcat; *9* — șicane interioare; *10* — exhaustor.

Uscătoarele cu tambur se utilizează pentru uscarea materialelor granulare, cărbuni, argile, pirite, fosfați, săruri minerale etc. Uscătoarele cu tambur se construiesc și pentru funcționarea combinată, contact indirect și contact direct, cu agentul de uscare, cînd este necesară menajarea termică a materialului. Uscătoarele cu tambur prezintă următoarele avantaje importante: uscare intensivă și uniformă; productivități mari îndepărtînd pînă la 100 kg umiditate/m³ h; compactitate.

4) Uscătoare cu valțuri

Aceste uscătoare constau din unul sau două valțuri (cilindri) orizontale și servesc la uscarea soluțiilor, suspensiilor și pastelor nu prea consistente. Valțurile uscătorului sînt încălzite prin interior cu abur, apă caldă sau ulei. Lichidul de uscat se întinde pe suprafața valțului sub forma unui film subțire, care datorită încălzirii din interior, se usucă pînă la anhidru, în timp ce valțul efectuează trei sferturi dintr-o turație. Pelicula de material solid formată este îndepărtată cu ajutorul unui cuțit de desprindere. Formarea filmului de lichid pe suprafața valțului se poate face prin afundarea valțului

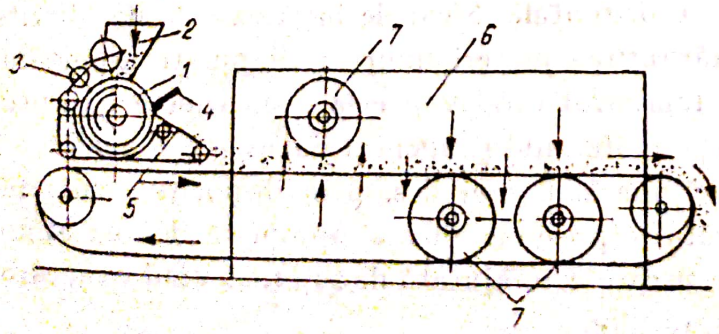


Fig. 209. Instalație de uscare în două trepte:

1 — valț; *2* — pîlnie de alimentare; *3* — rulou de presare; *4* — cuțit-pieptăn; *5* — pînză pentru susținerea materialului în timpul uscării; *6* — bandă de uscare; *7* — ventilatoare.

în lichid, prin alimentare în jgheab deversor, prin stropire sau prin alimentare la partea superioară (numai la uscătorul cu două valțuri). Uscătoarele cu valțuri pot funcționa în vid sau la presiunea atmosferică.

Pentru uscarea pastelor servesc instalațiile de uscare în două trepte sau de uscare cu preformare (fig. 209), care constau dintr-un uscător cu un singur valț *1* pentru uscarea prealabilă și dintr-o bandă uscătoare *6* pentru uscarea pînă la umiditatea finală. Suprafața valțului uscătorului este prevăzută cu șanțuri cu adîncimi de pînă la 8 mm în care se presează, pentru preformare, cu ajutorul unui rulou *3*, pasta ce urmează să fie uscată; după uscare, materialul este îndepărtat cu ușurință cu un piepten de desprindere *4*. Materialul astfel preformat este uscat în continuare pe uscătorul cu bandă.

5) Uscătoare pneumatice

În uscătoarele pneumatice materialul supus uscării se usucă în timp ce este antrenat și transportat de către agentul de uscare care se deplasează prin instalație cu o viteză corespunzătoare.

Schița unei instalații de uscare pneumatică este reprezentată în figura 210. După cum se observă, uscătorul propriu-zis reprezintă o conductă *6* de lungime relativ mare, atingînd 10—20 m, străbătută cu o viteză de 20—40 m/s de către curentul de agent de uscare și de materialul de uscat; separarea materialului uscat de agentul de uscare se realizează cu ajutorul unui ciclon *5*. Aerul necesar uscării, debitat de către o suflantă *3*, este încălzit într-un calorifer *2* înainte de a intra în uscător. Dacă se lucrează cu gaze de ardere ca agent de uscare, acestea se produc într-un focar special, circulația lor fiind asigurată de către un exhaustor montat după ciclonul de separare.

Uscătoarele pneumatice se utilizează pentru uscarea materialelor granulare nelipicioase; se pot utiliza și pentru uscarea pastelor, după ce acestea se granulează prin amestecare cu materialul granular obținut în urma uscării.

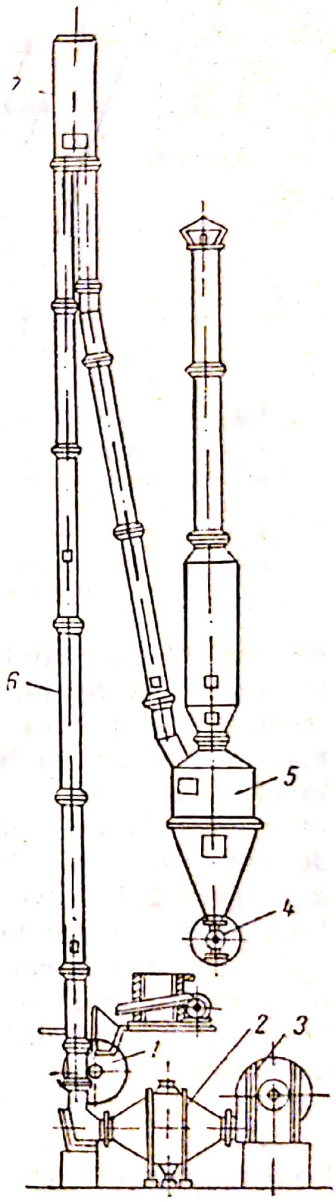


Fig. 210. Instalație pneumatică de uscare:
1 — alimentare cu material; *2* — calorifer; *3* — ventilator; *4* — descărcarea materialului uscat; *5* — ciclon; *6* — conducta de uscare pneumatică (uscător propriu-zis); *7* — amortizor.

6) Uscătoare prin pulverizare

O mărire importantă a suprafeței de contact dintre material și agentul de uscare se realizează prin pulverizarea fină a lichidelor (soluții, suspensii), cu dispozitive speciale, numite uneori *atomizoare*. Mărirea suprafeței de contact duce atît la intensificarea operației cît și la reducerea duratei de uscare

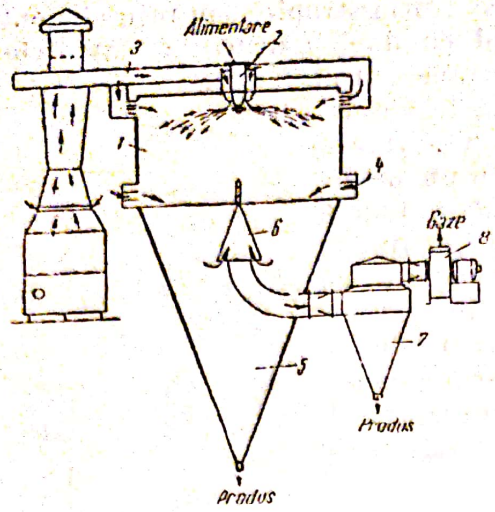


Fig. 211. Uscător prin pulverizare:
1 — cameră de uscare; *2* — dispozitiv de pulverizare; *3* — conductă pentru agentul de uscare; *4* — intrare pentru aerul rece; *5* — cameră conică pentru separarea pulberii; *6* — ieşirea agentului de uscare; *7* — ciclon; *8* — exhaustor.

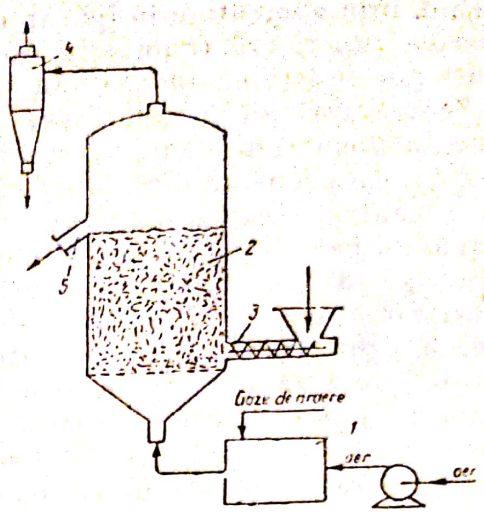


Fig. 212. Uscător cu strat fluidizat:
1 — cameră de amestec; *2* — uscător cu strat fluidizat; *3* — alimentarea materialului de uscat; *4* — ciclon; *5* — evacuarea materialului uscat.

de ordinul fracţiunilor de secundă pentru dimensiuni submilimetrice ale picăturilor de lichid. Din această cauză, uscătoarele prin pulverizare sînt recomandate pentru uscarea rapidă la temperaturi scăzute (140—150°C) a materialelor termolabile. Pulverizarea lichidului se poate realiza fie centrifugal, cu ajutorul unor discuri care se rotesc cu turaţie mare, fie cu ajutorul unor duze datorită presiunii lichidului de pulverizat sau presiunii unui fluid de pulverizare — abur sau aer comprimat. În uscătorul prin pulverizare din figura 211 pulverizarea se realizează centrifugal, cu ajutorul unui disc. Lichidul pulverizat vine în contact cu agentul de uscare pe la partea superioară a camerei cilindrice a uscătorului; dacă materialul este sensibil la temperatură în stare uscată, se introduce un curent de aer rece în partea inferioară a camerei. O parte din materialul uscat pînă la anhidru (sub formă de pulbere) se depune în partea inferioară, conică, a uscătorului, iar altă parte este antrenată de către agentul de uscare şi separată într-un ciclon sau în filtre cu saci; un exhaustor, montat după ciclon, asigură circulaţia agentului de uscare. Uscătorul poate funcţiona, atît cu aer cald, cît şi cu gaze de ardere; cînd se lucrează cu gaze de ardere, acestea sînt amestecate în prealabil cu aer rece pentru reducerea temperaturii pînă la 140—150°C.

Dintre avantajele uscătoarelor prin pulverizare trebuie reţinute rapiditatea uscării la temperatură coborîtă şi posibilitatea obţinerii produsului sub formă de pulbere.

7) Uscătoare prin fluidizare

Intensificarea operaţiei de uscare prin aplicarea fluidizării se datoreşte creşterii vitezei de transfer de căldură şi de masă între cele două faze ale sistemului care duce la uniformizarea rapidă a temperaturilor materialului şi agen-

tului de uscare. Ca agent de uscare se utilizează gazele de ardere sau aerul cald. Se utilizează aparate simple cu un singur strat sau aparate cu mai multe straturi, care permit o bună utilizare atît a căldurii cît și a agentului de uscare. În figura 212 este reprezentată schema unei instalații de uscare prin fluidizare cuprinzînd un aparat de fluidizare simplu cu un singur strat. Gazele de amestec utilizate ca agent de uscare, sînt diluate cu aer într-o cameră de ardere, pentru reducerea temperaturii; pentru uscarea unor materiale insensibile la temperatură, de exemplu cărbuni, se pot utiliza gazele de ardere ca atare, fără a li se reduce temperatura prin amestecarea cu aer.

Verificarea cunoștințelor

1. Definiți parametrii aerului umed.
2. Ce este viteza de uscare? Prezentați factorii de care depinde.
3. Prezentați constructiv și funcțional uscătoarele cameră.
4. Ce materiale se pot usca în uscătoarele cameră?
5. Ce precauții se iau la uscarea materialelor termolabile? Care sînt uscătoarele indicate în acest caz?

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VIII

APARATE DE MĂSURAT ŞI DE CONTROL

A. MĂSURAREA ŞI CONTROLUL MĂRIMILOR FIZICE

1. SCOPUL MĂSURĂRII ŞI A CONTROLULUI MĂRIMILOR ÎN INDUSTRIA CHIMICĂ

Prin **măsurare** se înţelege compararea mărimii fizice de măsurat cu o valoare a ei admisă ca unitate de măsură. Numărul care indică de cîte ori se cuprinde unitatea de măsură în mărimea fizică respectivă se numeşte *valoare numerică a mărimii măsurate.*

Prin **control** se înţelege compararea mărimii fizice controlate cu anumite valori limită dinainte stabilite. Scopul controlului este de a stabili dacă mărimea controlată are valoarea cuprinsă între aceste limite sau în afara lor.

Măsurarea şi controlul fiind deci operaţii de comparare ele se pot face manual (de exemplu, măsurarea unei lungimi cu rigla gradată) sau automat.

În anumite cazuri, măsurarea se face direct, prin compararea mărimii de măsurat cu unitatea ei de măsură. Sînt însă mărimi care nu se pot măsura direct deoarece este incomod de executat. De exemplu, o temperatură are admisă ca unitate de măsură tot o temperatură. A determina valoarea numerică în acest caz înseamnă a compara o temperatură cu o altă temperatură, ceea ce este foarte dificil. De aceea, majoritatea aparatelor de măsurat au în componenţa lor un element care transformă (converteşte), în prealabil, mărimea de măsurat într-o mărime fizică mai uşor de comparat cu unitatea ei de măsură. Convertirea se face în: deplasare liniară, deplasare unghiulară, curent electric sau tensiune electrică etc. De exemplu, în cazul măsurării temperaturii unui lichid cu ajutorul unui termometru, variaţia de temperatură care apare este transformată în deplasare liniară: mercurul din rezervorul termometrului se dilată şi se ridică în tubul capilar cu 5 mm atunci cînd temperatura creşte cu 10°C. Astfel, unităţii de măsură de 1°C îi corespund 0,5 mm deplasare a mercurului în tubul capilar (fig. 213).

Dispozitivul folosit pentru convertirea unei mărimi de o anumită valoare fizică (de exemplu, o temperatură) într-o mărime de altă natură fizică (de exemplu, deplasare) se numeşte *traductor.*

La un aparat de măsurat, valoarea numerică a mărimii măsurate se indică pe o scară gradată, pe care sînt trasate diviziuni şi sînt scrise diverse valori numerice în limitele de măsurare ale aparatului. Aceste limite sînt diferite de la un aparat la altul.

Valoarea numerică a mărimilor măsurate se citeşte pe scara gradată în dreptul unui indicator sau reper. Mai există aparate care sînt prevăzute cu ac indicator, spot luminos etc. În cazul aparatului de măsurat din figura 213

Scanned with OKEN Scanner

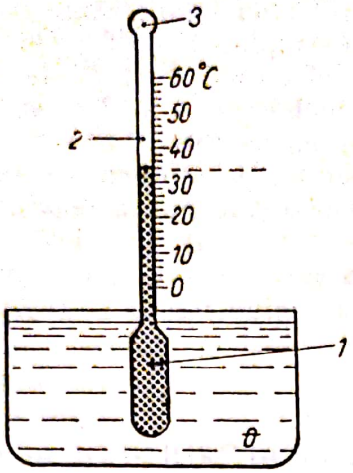


Fig. 213. Măsurarea temperaturii cu termometru: *1* — rezervor cu mercur; *2* — tub capilar; *3* — rezervor de siguranță.

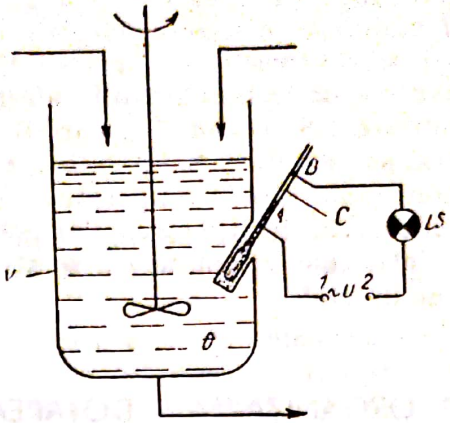


Fig. 214. Controlul temperaturii: *V* — vas tehnologic; *1* și *2* — borne; *A* și *B* — electrozi; *LS* — lampa de semnalizare; *C* — tub capilar.

(termometrul cu mercur), părțile componente sînt traductorul și scara gradată cu indicatorul, care pun în evidență valoarea numerică a mărimii măsurate. Traductorul se compune din rezervorul *1* și tubul capilar *2*, transformînd (convertind) temperatura în deplasare liniară.

În industria chimică măsurarea și controlul operativ (în scopul dirijării procesului de către operatori) se poate face de la distanță, dintr-o cameră de comandă, unde se găsesc aparatele care furnizează informațiile despre evoluția diferiților parametri ai procesului.

Paralel însă cu sistemele de măsurare și control operativ central, pentru unii parametri, există montate în instalație, local, aparate de măsurare și control a aceloraşi parametri.

Aparatura pentru măsurarea și controlul local este destinată în principal urmăririi anumitor parametri tehnologici în perioada de pornire a utilajelor, deoarece, uneori, pornirea și oprirea utilajelor necesită manevre locale desfășurate simultan cu urmărirea evoluției parametrilor. După intrarea în regim nominal se trece pe controlul automat central.

Parametrii tehnologici întîlniți cel mai frecvent în industria chimică sînt mărimi fizice, ca: temperatura, presiunea, debitul, viteza de curgere a fluidelor prin conducte, nivelul de lichid sau de materiale pulverulente ori alte mărimi care caracterizează calitatea materiei prime sau a produselor (*p*H, umiditate, densitate, viscozitate, culoare etc.). Sistemele de control automat semnalizează optic sau acustic (de exemplu prin aprinderea unei lămpi de semnalizare sau prin punerea în funcțiune a unei hupe sau a unui gong) ieșirea din limite a mărimii controlate.

În figura 214 este prezentat sistemul de control automat al temperaturii, folosind un traductor de temperatură similar cu cel al termometrului din figura 213.

În tubul capilar *C* sînt fixați doi electrozi *A* și *B*. Electrodul *A* se fixează la capătul inferior al tubului capilar, iar electrodul *B* la partea superioară,

Scanned with OKEN Scanner

într-un punct pînă la care se ridică mercurul cînd temperatura θ din vasul tehnologic atinge valoarea limită θ_{lim} (de exemplu, de 50°C); cînd $\theta > 50°C$, mercurul stabilește contactul electric între electrozii A și B. În acest caz, avînd o sursă de tensiune U, conectată între bornele *1* și *2* se stabilește un circuit electric (de la borna *1* prin electrodul A, mercur, electrodul B, lampa de semnalizare LS, borna *2* a sursei), și lampa de semnalizare se aprinde. Acesta este semnalul că temperatura în vasul tehnologic a depășit valoarea limită admisibilă. Cînd temperatura scade sub limita maximă admisibilă de 50°C, mercurul din tubul capilar coboară sub punctul B, contactul dintre A și B se întrerupe, și lampa LS se stinge, indicînd faptul că temperatura a reintrat în normal.

2. ORGANIZAREA ȘI DOTAREA LABORATORULUI DE AMC

Pentru măsurări de laborator se folosesc aparate specifice fiecărei mărimi fizice (mărimi, denumite, în general parametrii tehnologici). Pentru măsurarea temperaturilor se folosesc termometre de sticlă cu lichid, care măsoară temperaturi în limite de pînă la 100°C.

Pentru obținerea unor temperaturi variabile, temperaturi care să se măsoare cu termometrele de laborator, se folosesc cuptoare electrice de laborator. Cuptoarele electrice de laborator transformă energia electrică în energie calorică și o transmit materialului din spațiul încălzit prin radiație și convecție. Pentru măsurarea mărimilor electrice se folosesc voltmetre, ampermetre, wattmetre, punți de măsurare, logometre, compensatoare etc.

Pentru măsurarea mărimilor mecanice se prevăd aparate, ca: balanțe tehnice și analitice, densimetre, viscozimetre.

Pentru parametrii: presiune, debit, nivel se folosesc: manometre, debitmetre, nivelmetre.

Pentru determinarea compoziției substanțelor se folosesc analizoare, ca: *p*H-metre etc.

Fiecare instrument sau aparat de măsură este însoțit de o fișă tehnică care să dea relații despre utilitatea instrumentului sau aparatului respectiv.

B. MĂSURAREA UNEI MĂRIMI FIZICE. UNITĂȚI DE MĂSURĂ

1. MĂRIMI FIZICE

În activitatea practică prezintă o importanță deosebită acele mărimi care pot fi evaluate cantitativ și se pot exprima valoric, în raport cu mărimile de referință de aceeași natură. Din categoria acestor mărimi fac parte: lungimea, masa, viteza, timpul, temperatura, intensitatea curentului electric etc.

Scanned with OKEN Scanner

Astfel de mărimi sînt mărimile fizice.

Mărimile fizice au dimensiuni fizice avînd totodată proprietatea esențială de a putea fi mai mari sau mai mici, de a putea crește sau descrește.

Între diferitele mărimi fizice pot exista anumite relații fizice care se exprimă sub forma unor ecuații matematice în care mărimile sînt reprezentate prin simboluri literare.

Determinarea cantitativă a mărimilor fizice se realizează prin operația de măsurare.

A măsura o mărime fizică înseamnă a stabili de cîte ori mărimea respectivă este mai mare sau mai mică decît o mărime de referință de aceeași natură, considerată etalon.

Rezultatul măsurării unei mărimi fizice este un număr, care reprezintă valoarea numerică a acestei mărimi. Dacă mărimea de măsurat este M și unitatea de măsură (etalon) este U, atunci raportul:

$$\frac{M}{U} = n \tag{201}$$

n reprezintă valoarea numerică a mărimii măsurate.

Relația (201) se mai poate scrie:

$$M = n \cdot U \tag{202}$$

și poartă denumirea de ecuația măsurării.

În cazul în care mărimea M se măsoară cu ajutorul a două unități de măsură diferite de exemplu U_1 și U_2 în baza relației (202) se poate scrie:

$$M = n_1 \cdot U_1 \tag{203}$$

și

$$M = n_2 \cdot U_2 \tag{204}$$

Dacă se împart relațiile (203) și (204) membru cu membru, se obține:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1} = K \tag{205}$$

ceea ce arată că valoarea numerică a unei mărimi fizice variază invers proporțional cu unitatea de măsură adoptată pentru măsurarea ei.

Întrucît în natură există un număr mare de mărimi fizice, rezultă că pentru definirea lor este necesar un număr tot atît de mare de unități de măsură, fiecare unitate de măsură, independentă de celelalte, putînd fi aleasă arbitrar.

Dezvoltarea industrială (aducînd după sine utilizarea unui număr foarte mare de mărimi fizice) a făcut necesară stabilirea unor etaloane care să poată fi utilizate la măsurarea mai multor mărimi fizice, ajungîndu-se astfel la reducerea numărului de unități de măsură. Pentru aceasta, s-au stabilit legături de dependență (exprimate prin legi sau prin ecuații de definiție) între diversele unități de măsură astfel încît unele dintre ele (denumite unități derivate) se pot exprima cu ajutorul altora (denumite unități fundamentale) folosindu-se aceste legi sau ecuații de definiție.

Unitățile fundamentale (stabilite independent) servesc la măsurarea unor mărimi fizice fundamentale (denumite și mărimi fizice de bază deoarece nu

Tabela 6

Mărimile fundamentale utilizate în diferite capitole ale fizicii

Capitolul fizicii	Mărimile fundamentale
Cinematică	Lungime, timp
Dinamică	Lungime, timp, masă
Electromagnetism	Lungime, timp, masă, intensitatea curentului electric
Căldură	Lungime, timp, masă, temperatură termodinamică
Fotometrie	Lungime, timp, masă, intensitate luminoasă
Acustică	Lungime, timp, masă
Chimie fizică și fizică moleculară	Lungime, timp, masă, temperatură termodinamică
Fizică atomică și fizică nucleară	Lungime, timp, masă, intensitatea curentului electric

Tabela 7

Unitățile fundamentale, suplimentare și derivate adoptate pînă în prezent de Conferința Generală de Măsuri și Greutăți

Nr. crt.	Mărimea	Unitatea de măsură		
		Denumirea	Simbol	Simbol dimensional
	I. *Unități fundamentale*			
1	Lungime	metru	m	L
2	Masă	kilogram	kg	M
3	Timp	secundă	s	T
4	Intensitatea curentului electric	amper	A	I
5	Temperatura termodinamică	kelvin	K	θ
6	Intensitate luminoasă	candelă	Cd	I
	II. *Unități suplimentare*			
1	Unghi plan	radian	rad	—
2	Unghi solid	steradian	sr	—
	III. *Unități derivate*			
	1. Unități ale mărimilor de spațiu și timp			
1	Arie	metru pătrat	m^2	L^2
2	Volum	metru cub	m^3	L^3
3	Viteză	metru pe secundă	m/s	LT^{-1}
4	Viteză unghiulară	radian pe secundă	rad/s	T^{-1}
5	Accelerație	metru pe secundă la pătrat	m/s^2	LT^{-2}
6	Accelerație unghiulară	radian pe secundă la pătrat	rad/s^2	T^{-2}

se definesc cu ajutorul altor mărimi), iar unitățile derivate (exprimate cu ajutorul unităților fundamentale, pe baza unor legi sau a unor ecuații de definiție), servesc la măsurarea mărimilor derivate.

Scanned with OKEN Scanner

În acest fel, indiferent de tipul de mărimi fizice măsurate (fundamentale sau derivate), unităţile de măsură pot fi scrise numai cu ajutorul unităţilor fundamentale (fie independent alese, pentru cazul mărimilor fundamentale, fie „derivate" din acestea pentru cazul măsurării mărimilor derivate. Cele spuse mai sus rezultă şi din tabelele 6 şi 7.

Sisteme de unităţi de măsură. Sistemul Internaţional de unităţi de măsură.

Totalitatea unităţilor fundamantale, precum şi a celor derivate folosite în unul sau mai multe domenii de măsurare formează un sistem de unităţi de măsură.

Întrucît unităţile fundamantale sînt independente între ele şi convenţional alese, pentru o anumită mărime fundamentală se pot alege una sau mai multe unităţi fundamentale, de exemplu, în cazul mărimii fundamentale — masă s-au utilizat ca unităţi fundamentale: gramul, kilogramul şi tona.

În etapa actuală există mai multe sisteme de unităţi de măsură care se deosebesc între ele prin unităţile lor fundamentale şi prin domeniile în care se folosesc.

Sistemul de unităţi de măsură obligatoriu şi legal în ţara noastră este Sistemul Internaţional de Unităţi (SI) ale cărui unităţi fundamentale se referă la: lungime (L), masă (M), timp (T), intensitatea curentului electric (I), temperatură termodinamică (θ) şi intensitatea luminoasă (J).

Ca unităţi de măsură în S.I. au fost adoptate:
- pentru lungime — metrul (m);
- pentru masă — kilogramul (kg);
- pentru timp — secunda (s);
- pentru intensitatea curentului electric — amperul (A);
- pentru temperatura termodinamică — grad Kelvin (°K);
- pentru intensitatea luminoasă — candela (Cd).

2. METODE ŞI MIJLOACE DE MĂSURARE

a. Metode de măsurare

După modul de obţinere a valorii numerice a mărimii de măsurat, metodele de măsurare pot fi: directe, indirecte şi combinate.

Metodele de măsurare directe sînt acelea prin care mărimea de măsurat se compară direct cu unitatea de măsură sau cu ajutorul unui aparat de măsurat gradat în unităţile respective, rezultatul fiind obţinut direct în unităţi de măsură. De exemplu, măsurarea curentului electric cu ampermetrul, a tensiunii cu voltmetrul etc.

Metodele de măsurare directe sînt cele mai numeroase, constituind baza măsurării tuturor mărimilor fizice. Aceste metode se împart în două grupe principale: metode de citire şi metode de comparaţie.

Metodele de citire constau în determinarea mărimii de măsurat prin citirea valorii acesteia pe scara gradată a unui aparat de măsurat. În acest caz, scara aparatului de măsurat este gradată direct în unităţile mărimii

Scanned with OKEN Scanner

de măsurat. Metodele de citire sînt foarte răspîndite în tehnica măsurărilor electrice, fiind folosite în toate cazurile în care nu este necesară o precizie mare a măsurătorilor.

Metodele de comparaţie constau în determinarea mărimii de măsurat prin compararea ei cu una sau mai multe măsuri. Această comparare se poate efectua prin trei metode: metoda de zero, metoda diferenţială şi metoda de substituţie. La metoda de zero (sau de compensaţie), efectul acţiunii mărimii de măsurat este compensat (redus la zero) de efectul acţiunii unei măsuri sau mărimi cunoscute de acelaşi fel. Compensarea efectului mărimii de măsurat cu cel al măsurării sau mărimii cunoscute se manifestă prin dispariţia unui fenomen sau a unei mărimi (curent, tensiune) într-o porţiune a circuitului de măsurare şi se determină cu foarte mare precizie cu ajutorul aparatelor de zero.

În metoda diferenţială, mărimea de măsurat se compară cu o măsură sau cu o mărime cunoscută, valoarea ei rezultînd din diferenţa dintre efectele simultane ale celor două mărimi asupra aparatului de măsurat.

La metoda de substituţie, mărimea de măsurat se compară cu o măsură sau cu o mărime cunoscută, substituind în montajul de măsurare pe una cu cealaltă şi urmărind obţinerea aceluiaşi efect asupra aparatului de măsurat în ambele cazuri. Cele mai importante şi mai răspîndite aparate de comparaţie sînt punţile echilibrate şi compensatoarele.

Metodele de măsurare indirecte sînt metodele prin care nu se măsoară direct mărimea de măsurat, ci alte mărimi de care aceasta este legată printr-o relaţie fizică cunoscută, rezultatul măsurării obţinîndu-se prin calcul. De exemplu, determinarea rezistenţelor cu voltmetrul şi ampermetrul din raportul dintre valorile tensiunii şi ale curentului, măsurate direct cu cele două aparate.

Metodele de măsurare combinate sînt metodele în care rezultatul se deduce din rezultatele mai multor măsurări directe sau indirecte, executate în condiţii diferite, ale aceleiaşi mărimi sau ale cîtorva mărimi de acelaşi fel. Valoarea numerică a mărimii de măsurat se determină prin rezolvarea ecuaţiilor în care sînt incluse rezultatele obţinute.

După caracterul măsurării în timp a mărimii de măsurat, metodele de măsurare pot fi continue şi discrete. În cazul măsurărilor continue, mărimea de măsurat se măsoară continuu în timp, în fiecare moment obţinîndu-se valoarea sa, rezultatele fiind astfel disponibile în permanenţă. În cazul măsurărilor discrete, mărimea de măsurat se măsoară numai la anumite intervale de timp, valorile obţinute corespunzînd numai anumitor momente.

După precizia de măsurare, se aplică metode de măsurare de laborator şi metode de măsurare industriale.

Măsurătorile de laborator se efectuează cu ajutorul metodelor şi a mijloacelor de măsurare de mare precizie şi necesită determinarea erorii de măsurare.

Măsurările industriale se efectuează cu metode şi mijloace de măsurare de precizie mai mică, admisibilă pentru scopul practic respectiv şi nu necesită determinarea erorii de măsurare.

Scanned with OKEN Scanner

b. Mijloacele de măsurare

Acestea cuprind:

— măsurile, care materializează unitatea de măsură, de exemplu rigla de măsurat (metrul), greutatea de cîntar (Kilogramul), cutia de rezistențe electrice;

— substanțele de măsură, care-și schimbă proprietățile fizice și chimice la anumite valori ale unor mărimi ce trebuie măsurate;

— aparatele de măsurat sau elementele de măsurat care servesc la compararea directă a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură, de exemplu: ampermetrul, termometrul, manometrul etc., sau un element de măsurat: tubul elastic al manometrului, plutitorul sau nivelmetrul etc. Asocierile unor mai multe măsuri și aparate de măsurat formează un ansamblu de măsurare.

Principiile de măsurare ale aparatelor se bazează pe natura fenomenelor fizice care stau la baza funcționării aparatelor și diferă de la un aparat la altul.

3. CLASA DE PRECIZIE

Întotdeauna, valoarea numerică reală X a unei mărimi fizice măsurate este diferită de valoarea X_m indicată de aparatul de măsurat. Diferența dintre valoarea numerică reală a mărimii măsurate și cea indicată de aparatul de măsurat se numește eroare de măsurare și se notează cu Δ,

$$\Delta = X - X_m \tag{206}$$

Această eroare nu este constantă ci se modifică întîmplător putînd lua diverse valori între limitele $-\Delta_{max}$ și $+\Delta_{max}$.

Eroarea poate fi diferită în diferite puncte de pe scara gradată a aparatului (între începutul scării X_{min} și sfîrșitul ei X_{max}). De cele mai multe ori, eroarea este mai mare la începutul scării gradate.

Precizia aparatelor este exprimată prin clasa de precizie. Clasa de precizie N este un număr care exprimă cît la sută din domeniul de măsurare al aparatului ($X_{max} - X_{min}$) reprezintă eroarea maximă (Δ_{max}) pe care aparatul o poate avea la o măsurare:

$$N(\%) = \frac{\pm\Delta_{max}}{X_{max} - X_{min}} \cdot 100 \tag{207}$$

Clasele de precizie standardizate sînt: 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2,5 și 5. Clasa de precizie, sub forma unui astfel de număr este scrisă pe cadranul aparatului (de obicei într-un cerc). Clasa de precizie este deosebit de utilă în alegerea aparatului de măsurat corespunzător scopului dat. De exemplu, un manometru cu scara gradată de la 0 la 50 KN/m², avînd clasa de precizie 1 este incorect să fie utilizat pentru măsurarea unei presiuni de 2 KN/m², deoarece valoarea indicată de aparat, pe de o parte nu se poate citi cu ușurință, iar pe de altă parte este afectată de o eroare mare de măsurare. Într-adevăr, acest aparat este caracterizat de eroarea maximă:

$$\Delta_{max} = (X_{max} - X_{min}) \cdot \frac{N}{100} = 50 \cdot \frac{1}{100} = 0{,}5 \text{ KN/m}^2$$

Scanned with OKEN Scanner

Valoarea indicată de aparat este cuprinsă deci între 2+0,5 și 2—0,5 KN/m². Pentru a putea măsura mai precis această presiune (de 2 KN/m²) nu este nevoie de un aparat de precizie mai ridicată (clasă 0,5 sau 0,1) ci de un aparat cu scară gradată de la 0 la 3 KN/m², de clasă de precizie chiar mai scăzută (1,5); valoarea numerică indicată va fi cuprinsă între 2+0,045 și 2—0,045 KN/m², deoarece eroarea maximă în acest caz este:

$$\Delta_{max}=3\cdot\frac{1,5}{100}=0,045 \text{ KN/m}^2.$$

Recomandarea generală în acest caz este ca: valoarea numerică a mărimii să se găsească în ultima treime a scării gradate a aparatului. Numai după asigurarea acestei condiții se pune problema alegerii clasei de precizie în funcție de eroarea maximă ce poate fi admisă la măsurarea mărimii respective. În laboratoare se folosesc aparate de clasă de precizie mare (sub 0,5) pe cînd în industrie clasa de precizie este de 1,5 sau 2,5.

C. MĂSURAREA MĂRIMILOR MECANICE

Mărimile mecanice pot fi măsurate și controlate fie cu aparate și instrumente mecanice fie cu traductoare (cu ieșire electrică sau pneumatică). Mărimile mecanice mai importante sînt masa, densitatea viscozitatea.

1. MĂSURAREA MASELOR

Masa unui corp se definește prin legea a doua a dinamicii, ca fiind raportul dintre forța aplicată corpului și accelerația pe care o capătă aceasta ca urmare a acțiunii forței:

$$m=\frac{F}{a} \tag{208}$$

în care:

m este masa corpului;

a — accelerația imprimată;

F — forța aplicată.

Greutatea unui corp reprezintă forța cu care pămîntul atrage acel corp. Greutatea este dependentă de masa corpului și de accelerația gravitațională la locul de măsurare. Avînd în vedere modul de definire a masei și a greutății, se poate stabili relația de interdependență dintre masă și greutate:

$$m=\frac{G}{g} \tag{209}$$

G este greutatea corpului;

g — accelerația gravitațională la locul de măsurare. Măsurarea masei se face prin metode de comparare utilizînd mase cunoscute (etaloane de măsură).

Scanned with OKEN Scanner

Unitatea fundamentală pentru măsurarea masei este Kilogramul (kg), reprezentînd masa prototipului internațional de platină iridiată adoptat ca etalon de către Conferința Generală de Măsuri și Greutăți, în anul 1889 și păstrat la Biroul Internațional de Măsuri și Greutăți din Sèvres — Franța.

Balanța analitică. Aparatele cele mai mult utilizate pentru măsurarea masei sînt aparate mecanice bazate pe principiul pîrghiilor. Pentru măsurarea maselor relativ mici, cu precizie deosebită, în laboratoarele de analize se utilizează balanța analitică (fig. 215).

Elementul principal al balanței este pîrghia *1*, cu brațe egale, care se sprijină prin intermediul cuțitului *3* pe coloana *2* a balanței. Pe pîrghia *1* sînt suspendate cu ajutorul cuțitului *5* cele două talere *4* ale balanței, prevăzute cu amortizoare hidraulice de oscilații *6*. Citirea greutăților se face pe un cadran cu ajutorul acului indicator *7*. Întreg ansamblul este fixat într-o cutie protectoare prevăzută cu nivelă de aer și cu picioare ajustabile pentru asigurarea orizontalității. Balanțele analitice sînt utilizate exclusiv pentru măsurări de laborator. La aceste aparate sarcinile maxime pot fi de la 0,5 ... la 200 g, cu erori de măsurare de 0,03 ... 1 mg.

Balanța tehnică. În industrie, pentru măsurarea greutăților se folosesc balanțe tehnice cu pîrghii, de tipul celei prezentate în figura 216. Constructiv, ele sînt realizate ca și balanțele analitice, numai că le lipsesc amortizoarele hidraulice și cutia de protecție. Sînt realizate pentru sarcini maxime de 20 ... 50 kg cu erori de măsurare de 0,4 ... 300 mg.

Balanța zecimală. Pentru măsurarea greutăților mai mari se folosesc balanțe zecimale, de exemplu pînă la 500 Kg. Schema cinematică de principiu este reprezentată în figura 217.

Elementul de bază al balanței îl reprezintă sistemul de pîrghii cu brațe neegale care impune, pentru realizarea echilibrului, condiția dată de relația:

$$\frac{M}{X}=\frac{a}{b}=\frac{1}{n} \qquad (210)$$

în care $n=10$, în cazul balanței zecimale.

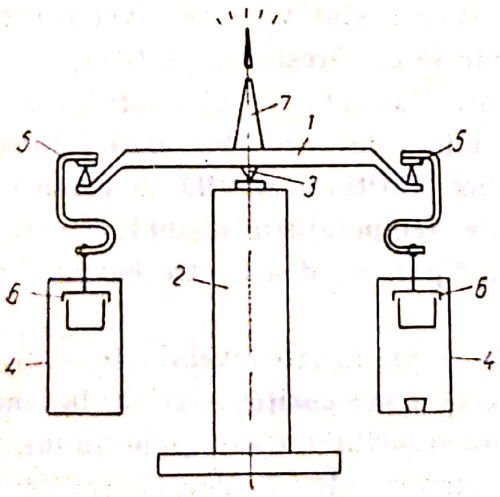


Fig. 215. Schema de principiu a balanței analitice.

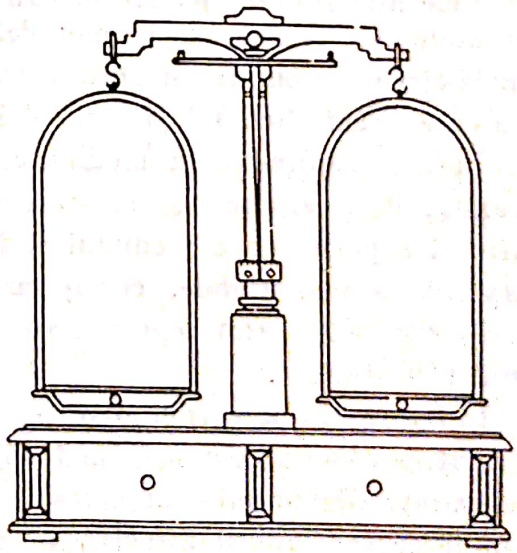


Fig. 216. Schema balanței tehnice.

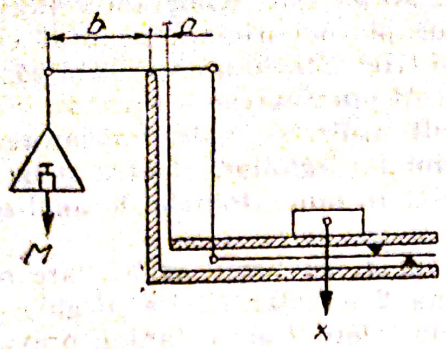


Fig. 217. Schema cinematică de principiu a balanței zecimale.

Pentru a înlătura dezavantajul folosirii greutăților etalon, subdivizionare, unele balanțe zecimale au brațul *b* crestat, echilibrîndu-se prin deplasarea unui cursor-greutate în lungul brațului. Balanțele zecimale obișnuite sînt realizate pentru sarcini maxime de 50, 100, 200 și 500 Kg, sarcinile minime fiind de 5% din cele maxime admise.

Datorită necesităților industriale de micșorare a timpului necesar operației de cîntărire și pentru a evita erorile introduse de operator, în procesele tehnice ce folosesc tot mai mult mijloacele automate de măsurare a maselor. Aceste aparate automate sînt realizate fie prin sisteme de pîrghii de echilibrare, fie prin utilizarea unor elemente elastice ca traductoare de măsurare indirectă a masei.

2. MĂSURAREA DENSITĂȚII

În condițiile de laborator, măsurarea densității reprezintă o operație banală, ușor de executat cu o precizie bună. Pentru măsurarea densității în flux continuu, în condițiile proceselor tehnologice industriale, deși în general se folosesc aceleași principii, realizarea unor aparate care să fie robuste, sensibile, precise a întîmpinat dificultăți. Pentru măsurarea densității se folosesc metode directe și indirecte.

a. Metode de măsurare directă

Cele mai simple aparate pentru măsurarea densității (densimetrele) sînt aparatele care se bazează pe metodele de cîntărire hidrostatică. În principiu, densimetrele automate cu cîntărire hidrostatică sînt vase de nivel constant prin care circulă lichidul analizat și în care se cîntărește un plutitor complet sau parțial scufundat în mediul cercetat. Varianta cu plutitorul complet cufundat dă o eroare de măsurare mai mică, datorită eliminării influenței tensiunii superficiale a mediului și în plus plutitorul se află în condiții de temperatură mai stabile, corespunzătoare temperaturii mediului cercetat.

În figura 218 sînt reprezentate două tipuri de densimetre cu plutitorul complet scufundat.

În figura 218, *a*, corpul aparatului este un vas în care nivelul este menținut constant de către un sistem sifon *3*. Plutitorul *1* ia o poziție relativă, în funcție de densitatea lichidului și acționează asupra resortului *4* care pune în mișcare sistemul de indicare și înregistrare *5*. În figura 218, *b*, densimetrul avînd un plutitor suplimentar, nivelul în vas se menține constant printr-un preaplin. Plutitorul principal *1* este echilibrat de plutitorul suplimentar *2*, plasat

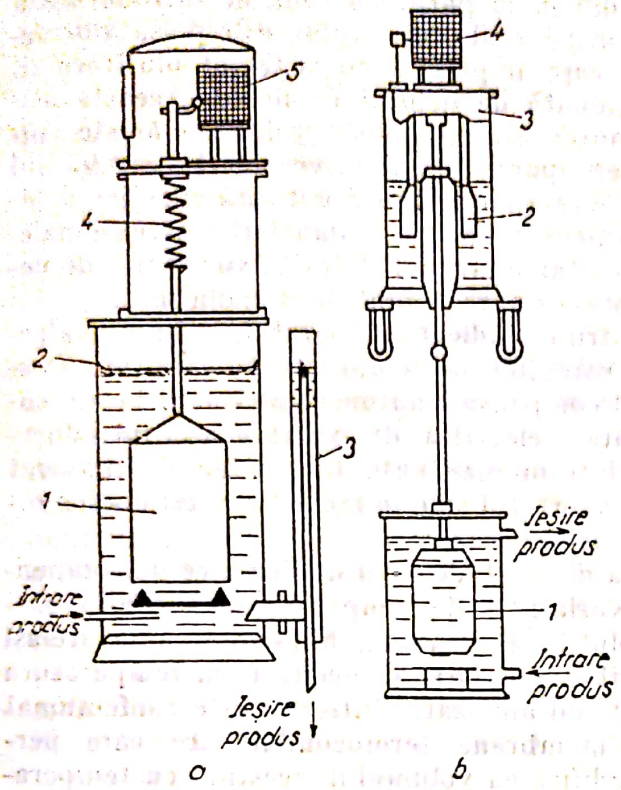


Fig. 218. Densimetre hidrostatice cu indicație locală:

a — cu resort de echilibrare; *1* — plutitor; *2* — vas de măsurat; *3* — sifon; *4* — resort; *5* — sistem de indicare înregistrare; *b* — cu plutitor suplimentar; *1* — plutitor principal; *2* — plutitor suplimentar; *3* — vas cu lichid etalon; *4* — sistem de indicare-înregistrare.

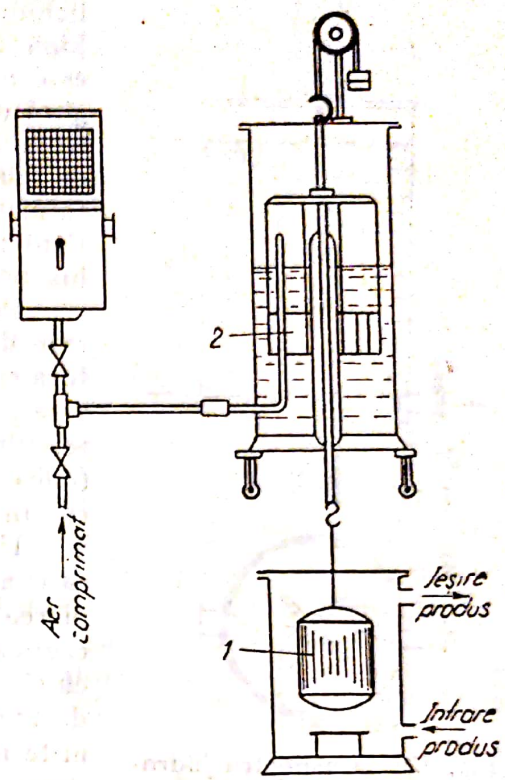


Fig. 219. Densimetru hidrostatic pentru transmitere la distanță, cu semnal de ieșire pneumatic.

în vasul *3* cu lichid etalon. La modificarea densității lichidului măsurat, apare o rezultantă care acționează sistemul de indicare și înregistrare *4*. Prin alegerea formei și a secțiunii plutitorului suplimentar se obține, de la caz la caz, sensibilitatea necesară. Pentru transmiterea la distanță a valorilor măsurate se utilizează fie sistemul cu convertor pneumatic (fig. 219), fie sistemul de convertor inductiv (fig. 220).

În cazul din figura 219 în locul plutitorului suplimentar în lichidul etalon este scufundat un sistem de amortizare cu clopot *2* (convertorul pneumatic). Dacă se modifică densitatea, respectiv greutatea aparentă a plutitorului de măsurare *1*, clopotul își modifică poziția provocînd o variație a presiunii aerului comprimat de alimentare, care se transmite la aparatul de indicare-înregistrare. La densimetrele cu semnal de ieșire electric (fig. 220), plutitorul principal *3* este solidar cu un miez de fier *4* care se deplasează în convertorul inductiv *5*. Plutitorul principal este echilibrat de un plutitor suplimentar *1* plasat în mercur. În funcție de densitatea mediului cercetat, sistemul de plutitoare se scufundă mai mult sau mai puțin în mercur provocînd o variație a inductivității în convertor. În vasul de măsurat lichidul este introdus tan-

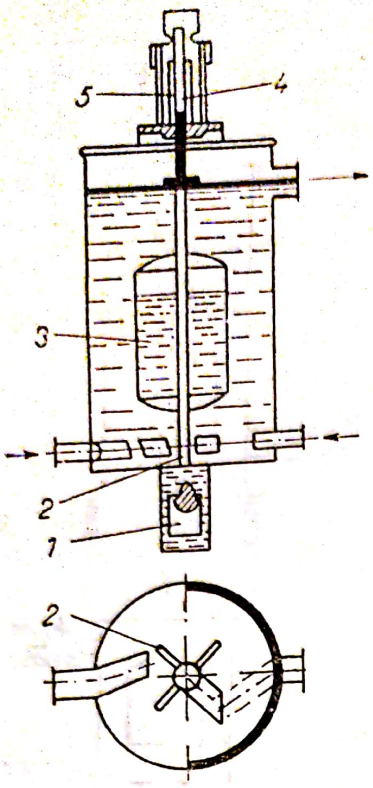


Fig. 220. Densimetru hidrostatic pentru transmitere la distanță, cu semnal de ieșire electric.

genţial din două părţi. În zona de introducere a lichidului, pe axul plutitorului, este plasată o turbină *2*, care împreună cu sistemul plutitorului, este acţionată de debitul de lichid. Aceasta asigură o autocentrare a plutitorului şi măreşte sensibilitatea aparatului, deoarece inerţia sistemului de plutire este compensată datorită energiei debitului de lichid şi nu pe seama forţei ascensionale. Pentru evitarea erorilor datorită variaţiilor de debit acesta este menţinut la 60 dm^3/h.

Pentru ca indicaţiile aparatului să nu fie afectate de corecţiile de temperatură, variaţiile acestora sînt compensate automat. Metoda de compensare poate fi electrică, de exemplu prin introducerea unei termorezistenţe în puntea de măsurat (dacă convertorul este inductiv) sau termodinamică, în celelalte cazuri.

Una din metodele termodinamice de compensare a variaţiilor de temperatură constă în umplerea plutitorului cu un lichid care să aibă acelaşi coeficient de variaţie a densităţii cu temperatura ca şi lichidul analizat. Plutitorul este confecţionat dintr-o membrană termoconductoare care permite modificarea volumului acestuia cu temperatura, forţa ascensională fiind constantă.

O altă metodă termodinamică de compensare constă în folosirea unui plutitor de comparaţie scufundat într-un lichid etalon aflat la temperatură constantă şi a unui plutitor de măsurare plasat în curentul de lichid analizat, pentru a lua temperatura acestuia. Acest plutitor, printr-un sistem de transmisie, echilibrează variaţiile densităţii măsurate cu temperatura lichidului. Limita minimă de măsurare a densităţii cu aceste tipuri de aparate este de 0,025 kg/cm^3. Eroarea aparatelor este de $\pm 3\%$ din indicaţia maximă. Viscozitatea lichidului nu trebuie să fie mai mare de 100 cP.

Există tipuri de aparate specializate pentru lichide agresive la temperaturi de 350°C şi presiuni de 35 daN/cm^2. Densitatea lichidelor, îndeosebi a acelora cu viscozitate mare, polifazate cu particule în suspensie, se poate măsura cu o precizie bună prin metode piezometrice bazate pe proprietăţile hidrostatice ale lichidelor. Pornind de la relaţia de bază:

$$P = \rho \cdot h \cdot g \qquad (221)$$

în care:

P este presiunea coloanei de lichid;

h — înălţimea lichidului;

g — acceleraţia gravitaţiei;

ρ — densitatea lichidului măsurat,

se poate măsura densitatea ρ atunci cînd celelalte elemente din relaţie sînt menţinute. Cea mai simplă metodă bazată pe această relaţie este metoda măsurării presiunii diferenţiale între două puncte pe o conductă verticală

(fig. 221). În acest montaj expresia căderii de presiune cauzată de variaţia densităţii este:

$$\Delta P = \Delta H \rho_t g = hg(\rho_t - \rho_t'), \qquad (212)$$

în care:

ΔP este căderea de presiune măsurată;
ρ_t — densitatea produsului analizat;
h — indicaţia manometrului diferenţial cu lichid;
ρ_t' — densitatea lichidului manometric;
ΔH — distanţa dintre prize.

În funcţie de tipul convertoarelor de presiune şi de metoda acestora de măsurare, se întîlnesc densimetrele piezometrice de următoarele tipuri: cu clopot, pneumatice cu membrană, sau hidraulice cu membrană. Pentru tipurile de densimetre care funcţionează pe baza măsurării presiunii pot fi utilizate convertoarele de presiune diferenţială dintr-un sistem unificat. Acestea pot avea indicatoare locale sau la distanţă, după necesităţile procesului tehnologic. Scara manometrului diferenţial sau cea a aparatului de măsurat secundar se gradează în unităţi de densitate sau concentraţie.

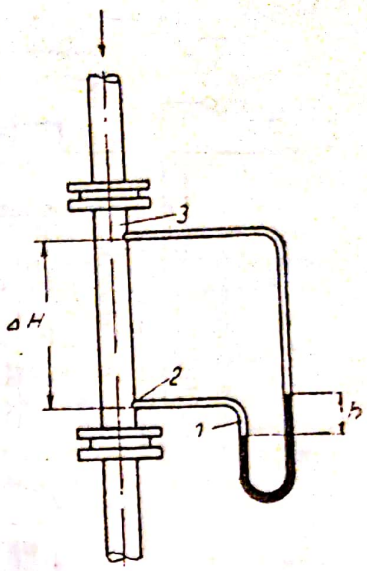


Fig. 221. Schema de principiu a densimetrului piezometric:
1 — manometrul cu tub U; 2 — priză de probă; 3 — conductă din care se ia proba.

Dacă densitatea produsului variază într-un anumit domeniu, de la ρ_{min} la ρ_{max}, valorii iniţiale îi corespunde o anumită cădere de presiune ΔP_{min}. De aceea, dacă se utilizează scara manometrului diferenţial sau a aparatului de măsurat secundar numai pentru domeniul de măsurare de la ρ_{min} la ρ_{max}, trebuie compensată printr-o metodă sau alta căderea de presiune ΔP_{min} (căderea de balast).

Dacă în sistemele receptoarelor de presiune şi a manometrelor diferenţiale sau într-un compensator separat, această cădere de presiune este compensată, se poate utiliza întreaga scară a manometrului diferenţial de la ρ_{min} la ρ_{max} (diviziunea 0 a scării va coincide cu ρ_{min}.)

b. Metode de măsurare indirectă

Metodele indirecte de măsurare a densităţii se bazează pe relaţiile care există între densitate şi alte mărimi, cum sînt: proprietăţile termice, şi electrice, amortizarea, radiaţiile ultrasonore sau radioactive etc. Una din metodele indirecte de măsurare a densităţii se bazează pe proprietăţile termice ale fluidelor. Plecînd de la fenomenul de variaţie liniară a densităţii cu temperatura, dacă un lichid a cărui densitate se măsoară este încălzit, proporţional cu variaţia densităţii, măsurarea temperaturii lichidului va fi o măsură a variaţiei densităţii.

Scanned with OKEN Scanner

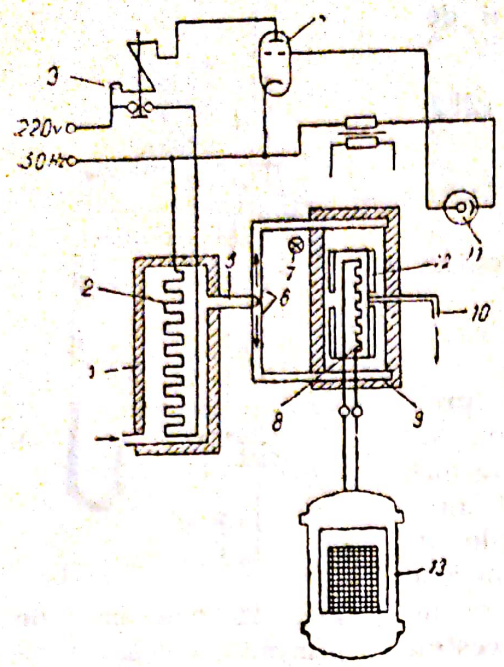


Fig. 222. Densimetru termic:

1 — vasul primar al traductorului; *2* — rezistența de încălzire; *3* — releu electromagnetic intermediar; *4* — tub electronic de amplificare; *5, 6* — conducte de conducere a probei; *7* — sursă de lumină; *8* — termorezistență; *9* — vas de măsurare; *10* — conductă de evacuare; *11* — celulă fotoelectrică; *12* — plutitor; *13* — aparat de măsurat.

În figura 222 este reprezentat un aparat de măsurare a densității pe acest principiu.

Drept element sensibil servește plutitorul de tip areometric *12*, a cărui greutate este constantă și care este scufundat complet în vasul de măsurare *9*. Lichidul analizat intră în vasul *1* și prin conductele *5* și *6* este condus în vasul de măsurare *9* din care este evacuat prin conducta *10*. Prin acest mod de alimentare și evacuare a lichidului, curentul exercită o acțiune minimă asupra plutitorului. Dacă densitatea lichidului crește plutitorul se ridică și întrerupe fasciculul de lumină emis de sursa *7*, pentru a fi captat de celula fotoelectrică *11*. Aceasta comandă prin tubul electronic *4* (triodă) și releul *3*, alimentarea cu curent a rezistenței de încălzire *2*. Prin încălzire, densitatea scade, plutitorul coboară, celula fotoelectrică este iluminată și prin aceleași elemente se oprește încălzirea. Deci, la densitate aparent constantă, temperatura lichidului măsurată cu termorezistența *8* este funcție de densitatea lichidului sau de concentrația acestuia la temperatura de referință de 20°C. Scara aparatului se gradează în unități de densitate. Precizia aparatului și precizia măsurării temperaturii au același ordin de mărime (clasă 0,5).

La utilizarea unui asemenea aparat se va ține seama ca variația temperaturii provocată de rezistența de încălzire a produselor lichide să fie limitată, pentru a se evita descompunerea lor.

3. MĂSURAREA VISCOZITĂȚII

În procesele chimice industriale, măsurarea viscozității are o largă răspîndire deoarece ea caracterizează curgerea fluidelor, structura moleculară (în cadrul proceselor de polimerizare), compoziția chimică, precum și unele calități de întrebuințare (proprietăți de ungere, adeziune etc.).

În industrie se utilizează fie măsurarea viscozității în unități absolute (viscozitate dinamică η și viscozitate cinematică ν), fie în unități relative,

Tabela 8

Tipuri de viscozimetre industriale continue

Tipul	Domeniul de măsurare p	Denumirea producătorului	Principiul de funcționare	Domeniul de utilizare
Capilar	$10^{-2} \ldots 10^{2}$	Hallikainen (Elliot)	Măsoară compresiunea necesară pentru curgerea unui debit constant de lichid printr-un tub capilar	Industria cauciucului, uleiuri, lacuri, vopsele
Rotativ	$10^{-2} \ldots 10^{9}$;	Brookfied	Măsoară momentul de rotație necesar rotirii unui cilindru într-un mediu viscos	Unsori, paste
Cu bilă căzătoare	$10^{-4} \ldots 10^{5}$;	Nacrosa	Măsoară viteza de cădere a unei bile într-un tub umplut cu mediu viscos	Uleiuri lubrefiante
Rotametric	$10^{-2} \ldots 10^{5}$;	Ficher și Porter	Măsoară înălțimea la care se ridică un plutitor într-un tub rotametric. Produsul este pompat în tub la un debit constant	Uleiuri lubrefiante
Vibrator	$10^{-3} \ldots 10^{3}$	Bendix ultra viscosori	Măsoară amortizarea unor vibrații produse în mediul de analizat	Lacuri, vopsele
Mecanic	5 ... 1 000	Dynatrol	Măsoară frînarea unei palete care se rotește în lichid	Cerneluri de tipar

cum sînt gradele Engler, secundele Saybolt, secundele Redwood etc. Măsurarea în flux continuu a viscozității se bazează pe următoarele principii:

— măsurarea amortizării unor oscilații mecanice (eventual a ultrasunetelor) în fluidul analizat;

— măsurarea forței de frecare a unui lichid față de un cilindru aflat în rotație sau față de ascensiunea unui plutitor într-un debit de lichid constant

— măsurarea variației debitului de curgere printr-un orificiu de secțiune constantă.

În tabela 8 sînt prezentate caracteristicile unor tipuri de viscozimetre industriale continue.

Viscozimetrul bazat pe măsurarea coeficientului de amortizare a unor oscilații mecanice. Schema de principiu a unui asemenea viscozimetru este reprezentată în figura 223.

Se compune dintr-o lamă metalică din aliaj de oțel de 50 mm lungime, 3 mm lățime și 0,2 mm grosime, care se introduce în lichidul a cărui densitate se măsoară și care constituie sursa oscilațiilor mecanice. Oscilațiile sînt întreținute de semnale electrice sub formă de impuls cu o frecvență variabilă, în funcție de viscozitatea lichidului. Coeficientul de amortizare a oscila-

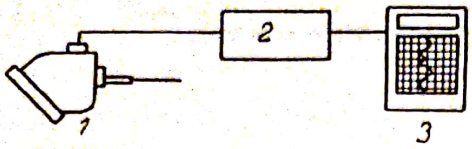


Fig. 223. Schema de principiu a măsurării viscozității cu oscilații mecanice:
1 — traductor; *2* — comparator de vibrații; *3* — înregistrator.

țiilor este măsurat de un sistem electronic cu circuit de amplificare a cărui ieșire este un semnal de 0...25 mV care poate fi preluat de un indicator potențiometric.

Există variante în care elementul sensibil al aparatului se montează direct în rezervor și variante în care aparatul în totalitatea lui este montat separat, proba fiind adusă la locul de măsurare printr-o conductă specială care asigură o curgere continuu în aceleași condiții de temperatură și presiune. Domeniile pentru care se fabrică asemenea aparate sînt: 0,15...5,0 ... ...50 și 0...50 000 cP.

Temperatura de lucru este cuprinsă între 100 și +350°C, iar presiunea maximă de lucru este de 70 daN/cm^2.

Viscozimetrul rotativ (fig. 224). Principial acest aparat se bazează pe măsurarea forței de frecare pe care o exercită lichidul a cărui viscozitate se măsoară, asupra unui cilindru aflat în mișcare de rotație.

Elementul de bază al acestui aparat îl constituie un recipient cilindric rotitor *1* în interiorul căruia, plasat concentric, este suspendat liber un cilindru *2*. În recipientul *1* se introduce substanța a cărei viscozitate se măsoară. Cînd cilindrul *1* se rotește, datorită frecării, antrenează și cilindrul liber *2*. Cunoscîndu-se valoarea cuplului de torsiune M care se imprimă acestuia și viteza unghiulară a cilindrului exterior ω_t, înălțimea cilindrului h și raza cilindrului interior η_t, se poate calcula viscozitatea lichidului, conform relației:

$$\eta = \frac{M}{2\pi \cdot h \cdot \omega_t \cdot r_t^2} \qquad (213)$$

La viscozimetrul rotativ considerat, cilindrul *1* se rotește cu viteza unghiulară constantă, fiind acționat de un motor sincron. Cuplul care se exercită asupra cilindrului *2* se măsoară prin următoarele metode:

— cuplul care se exercită asupra cilindrului de măsurat acționează asupra unui corp elastic. În acest caz, cilindrul se rotește cu un unghi φ proporțional cu cuplul M care este convertit prin intermediul unui convertor de deplasare unghiulară într-un semnal electric;

— cuplul se determină pe baza măsurării curentului absorbit de motorul de acționare.

Viscozimetrul bazat pe principiul măsurării debitului printr-o secțiune constantă. Metoda de determinare a viscozității care stă la baza acestui aparat se bazează pe principiul măsurării timpului de curgere a unei cantități precise de lichid printr-o secțiune constantă.

În figura 225 este reprezentat un tip de viscozimetru cu piston.

Lichidul analizat este absorbit de un piston *2* într-un cilindru prevăzut cu o deschidere calibrată *1* şi lăsat să se scurgă sub acţiunea greutăţii proprii prin acea deschidere într-un vas situat sub nivelul lichidului. Pistonul este acţionat de un motor electric sau pneumatic cu o frecvenţă constantă. Un sistem de ceasornic care se declanşează odată cu pistonul indică timpul de scurgere, timp care, înmulţit cu constanta aparatului indică viscozitatea lichidului.

O altă metodă adoptată pentru măsurarea continuă în procesele tehnologice se bazează pe măsurarea presiunii care apare într-un tub capilar prin care circulă lichidul cercetat cu o viteză constantă la o temperatură constantă. Presiunea se transformă într-un semnal care variază liniar cu viscozitatea. Tubul capilar se poate schimba uşor în funcţie de natura lichidului măsurat.

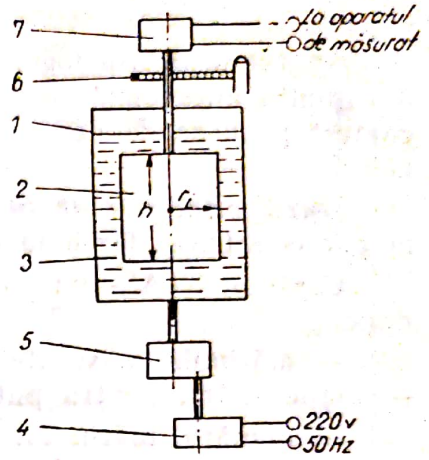


Fig. 224. Schema de principiu a viscozimetrului rotativ: *1* — cilindrul exterior; *2* — cilindrul interior; *3* — lichidul analizat; *4* — motor de antrenare; *5* — angrenaje; *6* — resort spiral *7* — convertor de deplasare unghiulară; *r* — raza exterioară a cilindrului interior; *h* — înălţimea cilindrului interior.

D. MĂSURAREA MĂRIMILOR ELECTRICE ŞI MAGNETICE

Deoarece nu orice mărime fizică poate fi uşor măsurată direct (măsurarea implicînd o operaţie de comparare), mărimile greu comparabile sînt, înainte de a fi măsurate, convertite cu ajutorul traductoarelor în mărimi fizice uşor comparabile ca: tensiuni electrice, curenţi electrici, deplasări, presiuni etc.

Aceasta a dus la o largă utilizare a aparatelor electrice de măsurat (în combinaţie cu diferite traductoare) şi pentru măsurarea mărimilor neelectrice.

Principalele aparate electrice, utilizate în combinaţie cu traductoare pentru măsurarea şi controlul parametrilor tehnologici, sînt: milivoltmetrele, compensatoarele, logometrele şi punţile de măsură.

1. CLASIFICAREA APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Aparatele electrice de măsurat se clasifică după următoarele criterii:

— *După sistemul constructiv folosit la realizarea aparatelor* de măsurat electrice se

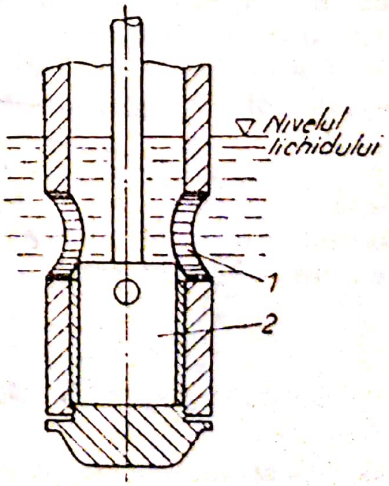


Fig. 225. Viscozimetru cu piston.

deosebesc: aparate cu cuplu antagonist mecanic (aparate magnetoelectrice etc). și aparate fără cuplu antagonist mecanic, denumite și logometre. Aparatele cu cuplu antagonist mecanic (fig. 226) sînt prevăzute cu un element elastic (arc spiral, fir de torsiune) care face ca sistemul mobil să ocupe în stare de repaus poziția inițială de zero, iar în funcționare o anumită poziție, determinată de egalitatea între cuplul activ (efect al mărimii de măsurat) și cuplul rezistent sau cuplu antagonist (efect al elementului elastic).

Aparatele de tip logometru nu posedă elemente mecanice de producere a cuplului antagonist, deviația fiind determinată de două cupluri de sens contrar produse de două înfășurări independente dispuse pe același sistem mobil.

După principiul de funcționare, aparatele electrice de măsurat pot fi: magnetoelectrice, feromagnetice, electrodinamice cu inducție, termice etc.

Conform STAS-ului 4640-62, aparatele de măsurat electrice se clasifică după:

— mărimile măsurate (pentru tensiuni — voltmetre; pentru curenți — ampermetre, pentru puteri — wattmetre etc);

— numărul mărimilor măsurate și al scărilor gradate (aparate cu două scări, aparate universale);

— protecția împotriva apei și gazelor (neprotejate, etanșe, capsulate)

— condițiile climatice (normale, tropicalizate etc.).

În multe din cazuri, măsurările nu se execută numai cu aparatele electrice propriu-zise, ci și cu ajutorul unor elemente ajutătoare: rezistențe adiționale, șunturi, capacități, reostate sau potențiometre. Aceste elemente de circuit se numesc *accesorii*. Pentru ușurința exploatării, pe cadranul aparatelor electrice se prevăd o serie de simboluri grafice care dau indicații asupra domeniului de folosire a aparatelor.

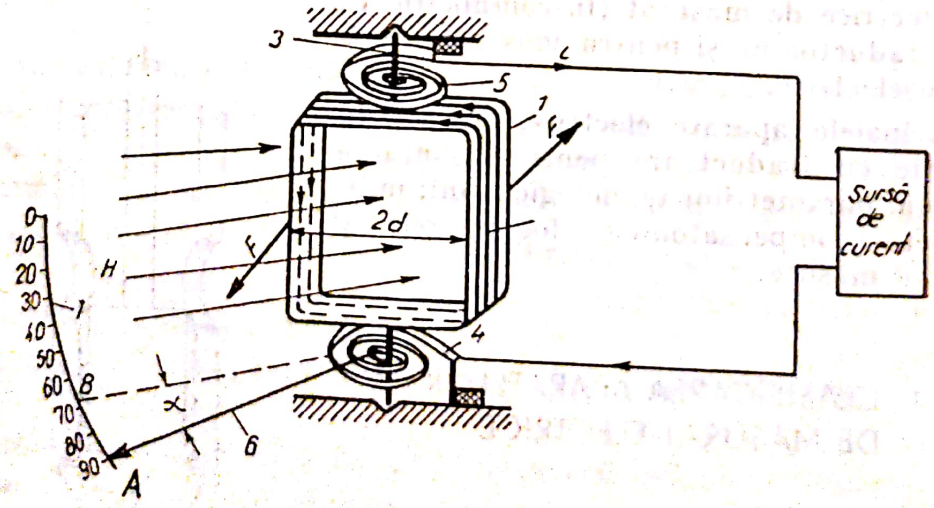


Fig. 226. Cadrul mobil al milivoltmetrului magnetoelectric:
1 — cadru; 2 — bobina mobilă; 3 — ax; 4, 5 — resorturi spirale; 6 — ac indicator; 7 — scară gradată.

Nr crt.	Semnificația simbolurilor înscrise pe cadranele aparatelor	Simbol	Nr crt.	Semnificația simbolurilor înscrise pe cadranele aparatelor	Simbol
1	Aparat magnetoelectric cu cadru mobil		7	Aparat feromagnetic cu fier mobil	
2	Aparat magnetoelectric cu redresor inclus în aparat		8	Aparat cu fier mobil și magnet	
3	Aparat magnetoelectric cu termocuplu		9	Aparat de inducție	
4	Logometru magnetoelectric		10	Referință la un document atașat aparatului	
5	Aparat electrodinamic		11	Reglajul de zero	
6	Aparat ferodinamic		12	Borna de pământ	

În tabela 9 sînt date simbolurile stabilite prin STAS 4640-62 și STAS 6419-61 referitoare la unele aparate electrice de măsurat.

2. MĂSURAREA CURENȚILOR ȘI A TENSIUNILOR

Curenții și tensiunile care se măsoară în industrie sau în laborator pot avea valori, de la microamperi și microvolți pînă la sute de amperi și mii de volți. Metodele și aparatele pentru măsurarea unui domeniu atît de larg a curenților și tensiunilor diferă după ordinul de mărime al acestora și după precizia cu care trebuie efectuată măsurarea. În general, curenții și tensiunile se măsoară prin metode de citire cu aparate indicatoare (ampermetre, voltmetre și galvanometre) de diferite tipuri după domeniul de măsurare. În măsurările de mare precizie se utilizează metode de compensație. Curenții și tensiunile foarte mici ($10^{-6}\cdots10^{-11}$ A și $10^{-4}\cdots10^{-8}$ V) se măsoară și se detectează cu ajutorul galvanometrelor de curent continuu și de curent alternativ.

Galvanometrele sînt aparate de foarte mare sensibilitate ($10^{5}\cdots10^{11}$ mm/A). Ele se utilizează fie ca aparate indicatoare pentru măsurarea valorilor foarte mici ale curenților, tensiunilor, fie ca aparate de zero în metodele de comparație, pentru a indica lipsa curentului sau a tensiunii într-un circuit.

a. Voltmetre magnetoelectrice. Milivoltmetre magnetoelectrice

La aparatele magnetoelectrice pentru deplasarea sistemului mobil se folosește energia cîmpului magnetic a ansamblului format dintr-unul sau mai mulți magneți permanenți și unul sau mai multe circuite parcurse de curenții de măsurat.

Scanned with OKEN Scanner

Milivoltmetrul se foloseşte pentru măsurarea tensiunii mici, conectîndu-se la diverse traductoare sau la alte surse de tensiune.

Sistemul mobil al aparatului (fig. 226) este format dintr-un cadru de aluminiu *1* pe care sînt înfăşurate spire dintr-un conductor de cupru emailat, avînd $\varnothing = 0{,}02 \ldots 0{,}2$ mm; acestea formează bobina mobilă *2*. Cadrul mobil *1* este fixat pe un ax *3*, în jurul căruia se poate roti. Rotirea axului este frînată de două resorturi spirale *4* şi *5*. Cînd cadrul mobil se roteşte cu un unghi α în sensul determinat de cuplul de forţe F, aceste resorturi reacţionează opunînd un cuplu antagonist M_a, proporţional cu unghiul α, conform relaţiei:

$$M_a = K\alpha, \tag{214}$$

în care K este o constantă de proporţionalitate.

Fiecare resort spiral are un capăt fixat de corpul aparatului (capăt fix) şi un capăt fixat de ax (capăt mobil). Începutul bobinei de pe cadrul mobil se conectează la capătul de pe ax al resortului *4*, iar sfîrşitul bobinei la capătul de pe ax al resortului *5*; astfel conectarea bobinei mobile la sursa de curent se face prin resorturile spirale *4* şi *5*. Dacă acest cadru mobil se introduce în cîmpul magnetic de intensitate constantă H şi inducţie:

$$B = \mu H \tag{215}$$

asupra conductoarelor laterale ale bobinei acţionează forţele electromagnetice F egale şi de sens contrar. Aceste forţe sînt proporţionale cu intensitatea cîmpului H, cu curentul i şi cu numărul de spire n ale bobinei, conform relaţiei:

$$F = K_0 n \cdot H \cdot i \tag{216}$$

în care K_0 este o constantă de proporţionalitate.

Deoarece forţele F care acţionează asupra părţilor laterale ale cadrului sînt paralele, ele formează un cuplu de forţe M care determină rotirea cadrului, rezultînd relaţia:

$$M = F \cdot d = d \cdot K_0 \cdot n \cdot H \cdot i, \tag{217}$$

în care d este jumătatea distanţei dintre conductoarele laterale ale spirelor bobinei. Acest cuplu determină rotirea cadrului mobil pînă cînd cuplul antagonist M_a dat de resorturi, care se opune rotirii, devine egal cu cuplul activ M şi are loc un echilibru.

$$M = M_a \tag{218}$$

sau

$$d \cdot K_0 \cdot n \cdot H \cdot i = K \cdot \alpha \tag{219}$$

Din relaţia (219) rezultă că unghiul de rotire α este proporţional cu curentul i, deci se poate scrie relaţia:

$$\alpha = \frac{d\, k_0 n H}{K} i = K_1 i \tag{220}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care K_1 este o constantă de proporționalitate.

Se constată că odată cu cadrul mobil se rotește tot cu unghiul α și acul indicator *6* (din punctul B în punctul A), indicînd pe scara gradată *7* valoarea curentului *i*. Pentru producerea cîmpului magnetic se folosește un magnet permanent *1* între ai cărui poli N și S (fig. 227) se găsește sistemul mobil *3*. Între polii *4* ai magnetului permanent este fixat miezul feromagnetic *2* ce concentrează liniile de cîmp. Astfel, sistemul mobil se rotește în întrefierul dintre poli și miezul feromagnetic fix, unde cîmpul magnetic este uniform. Dacă la bornele + și — ale unui aparat magnetoelectric se aplică o tensiune U foarte mică (miimi de volt) prin spirele bobinei se stabilește un curent *i* proporțional cu tensiunea conform relației prin care se exprimă legea lui Ohm:

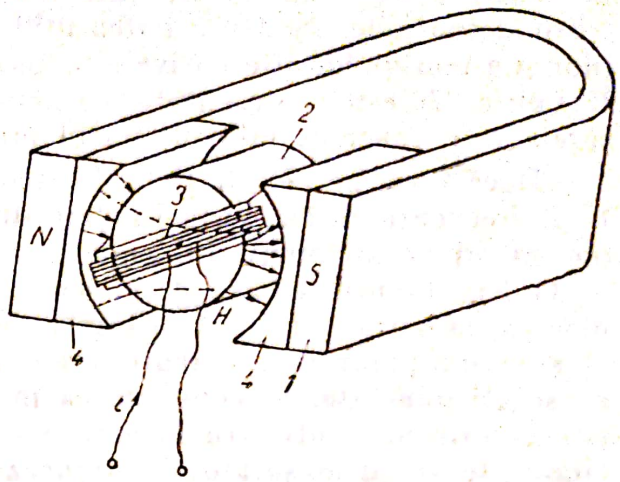


Fig. 227. Circuitul magnetic al unui aparat magnetoelectric.

$$i = \frac{U}{r}, \tag{221}$$

în care *r* este rezistența bobinei mobile.

În acest caz, aparatul poate fi etalonat direct în milivolți, deci valoarea tensiunii se poate citi direct în milivolți pe scara aparatului. În cazul folosirii aparatului magnetoelectric ca milivoltmetru se folosește un număr mai mare de spire.

Pentru a se măsura tensiuni mai mari cu milivoltmetrul magnetoelectric, se conectează în serie cu bobina mobilă o rezistență *R* astfel încît curentul prin spire să *i* nu depășească valoarea limită (fig. 228). S-a obținut în acest fel un voltmetru magnetoelectric. În acest caz intensitatea curentului în bobina aparatului este:

$$i = \frac{U}{r+R}, \tag{222}$$

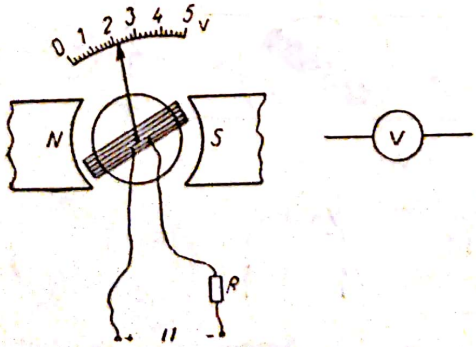


Fig. 228. Voltmetru magnetoelectric.

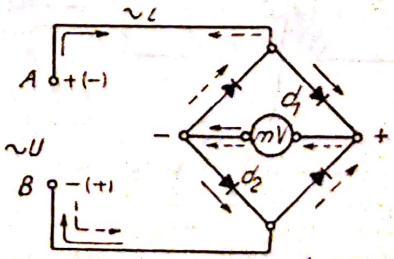


Fig. 229. Milivoltmetru de curent alternativ cu punte redresoare.

Se constată că, utilizînd aparate magnetoelectrice, se pot măsura numai tensiuni continue. Pentru a putea utiliza aceste aparate la măsurarea curenților și a tensiunilor alternative este necesară redresarea prealabilă a acestora. În figura 229 este reprezentată o schemă de redresare în punte, în diagonala căreia este conectat milivoltmetrul magnetoelectric.

Dacă între bornele A și B ale aparatului se aplică tensiunea alternativă U de frecvență 50 Hz, atunci polaritatea bornelor A și B alternează în timp (de 50 ori pe secundă). În semialternanța pozitivă a tensiunii (+ la A și — la B), curentul circulă de la borna A prin dioda d_1, prin milivoltmetru, dioda d_2 la borna B (sensul cu săgeți pline). În cealaltă semiperioadă (semnale + și — din paranteze), curentul are sensul de la borna B la borna A, indicat cu săgeți punctate. Se constată, că în cazul ambelor semiperioade, curentul circulă prin milivoltmetru în același sens (de la + la —) cu toate că polaritatea tensiunii măsurate U alternează. Deci scara aparatului poate fi etaonată în valori efective ale tensiunii alternative.

b. Ampermetre magnetoelectrice. Miliampermetre magnetoelectrice

Construcția și principiul de funcționare al miliampermetrelor magnetoelectrice sînt aceleași cu cele ale milivoltmetrelor magnetoelectrice. În figura 230, *a* este prezentată schema de principiu a miliampermetrului magnetoelectric, iar în figura 240, *b*, simbolul de reprezentare a acestuia în scheme.

Miliampermetrele magnetoelectrice se utilizează la măsurarea curenților foarte mici, pînă la 30—50 mA, fără șunturi sau rezistențe adiționale. Pentru măsurarea curenților de la cîțiva miliamperi pînă la zeci și chiar sute de amperi, aparatele magnetoelectrice se folosesc împreună cu șunturi, constituind în acest caz ampermetre magnetoelectrice.

În figura 231 este prezentată schema de utilizare a unui miliampermetru cu șunt (rezistența de șuntare a bornelor de intrare R) pentru mărirea dome-

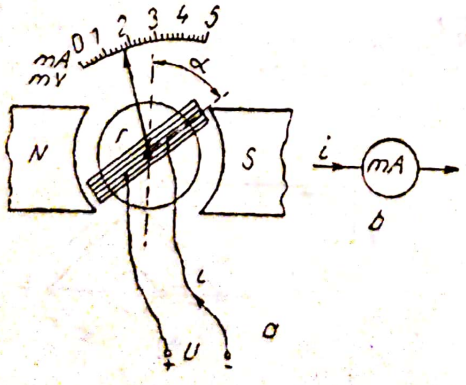


Fig. 230. Miliampermetru magnetoelectric:
a — schema de principiu; *b* — simbol.

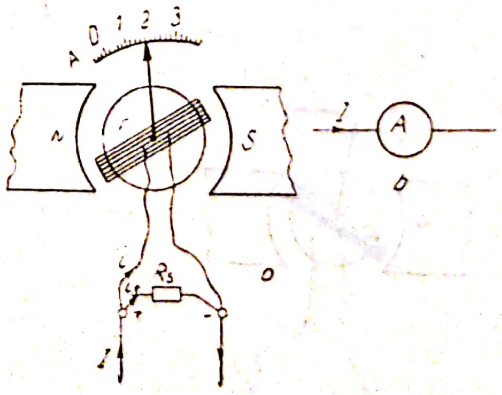


Fig. 231. Ampermetru magnetoelectric:
a — schema de principiu; *b* — simbol.

niului de măsurare al aparatului. În acest caz, curentul de măsurat I se divide, o parte i prin rezistența r a bobinei și o parte i_s prin șunt:

$$I=i+i_s \tag{223}$$

Alegînd în mod corespunzător Rs, se poate face ca scara aparatului să fie gradată în amperi.

c. Logometre magnetoelectrice

Logometrele sînt dispozitive de măsurat care măsoară raportul a doi curenți sau a două tensiuni.

Logometrele măsurînd raportul a doi curenți, conțin totdeauna două elemente mobile, asupra fiecăruia din ele acționînd unul din curenți. Cadrele mobile I și II sînt rigidizate și fixate pe același ax (fig. 232). În cazul logometrului, resorturile spirale pentru realizarea cuplului antagonist lipsesc.

Curenții i_1 și i_2 parcurg spirele bobinelor în sensuri diferite astfel încît forțele electromagnetice care rezultă și acționează asupra celor două cadre, F_1 și F_2, creează cupluri opuse, proporționale cu intensitățile curenților, cu inducțiile magnetice și cu numărul de spire:

$$\left.\begin{aligned} M_1&=K_0B_1i_1\\ M_2&=K_0B_2i_2 \end{aligned}\right\} \tag{224}$$

Starea de echilibru se obține cînd cele două cupluri sînt egale,

$$M_1=M_2,\ K_0B_1i_1=K_0B_2i_2 \tag{225}$$

deci cînd:

$$\frac{i_1}{i_2}=\frac{B_2}{B_1} \tag{226}$$

Dacă în diferite poziții ale sistemului mobil intensitatea cîmpului magnetic H_1 în care se găsesc spirele bobinei I este aceeași atunci:

$$B_1=\mu H_1=\text{ct.} \tag{227}$$

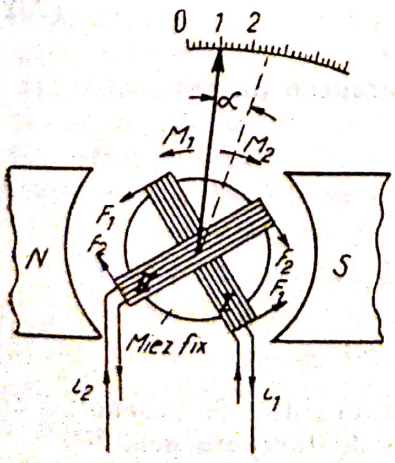


Fig. 232. Schema de principiu a logometrului.

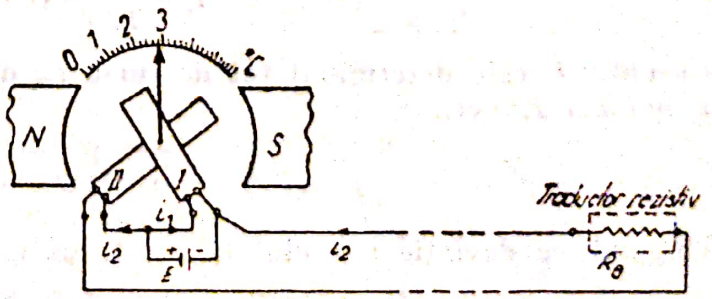


Fig. 233. Schema de utilizare a logometrului pentru măsurarea temperaturii.

Dacă între fierul dintre miezul magnetic fix și piesele polare este variabil, astfel încît intensitatea cîmpului magnetic în care se găsesc spirele bobinei II să se modifice proporțional cu unghiul de rotație a sistemului mobil, atunci:

$$B_2 = K \cdot \alpha, \tag{228}$$

unde K este o constantă.

Înlocuindu-se B_2 din relația (228) în relația (226) se obține:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{B_2}{B_1} = \frac{k \cdot \alpha}{B_1} \tag{229}$$

Relația (229) se mai poate scrie astfel:

$$\alpha = \frac{B_1}{K} \cdot \frac{i_1}{i_2} = K_1 \frac{i_1}{i_2} \tag{230}$$

Deci unghiul de rotație a sistemului mobil și deci a acului indicator α, este proporțional cu raportul celor doi curenți i_1 și i_2.

Făcînd ca i_1 să fie proporțional cu o tensiune U aplicată la bornele unei rezistențe oarecare R_θ, iar i_2 să fie egal cu intensitatea curentului prin această rezistență R_θ, rezultă că deviația acului indicator al logometrului este proporțională cu rezistența $\left(R_\theta = \frac{U}{i_2}\right)$, deci:

$$\alpha = K_1 \frac{i_1}{i_2} = K_1 K_2 \frac{U}{i_2} = K_1 K_2 R_\theta \tag{231}$$

În figura 233 este reprezentată schema de conexiuni în cazul în care logometrul este folosit pentru măsurarea temperaturii cu ajutorul unui traductor rezistiv de temperatură (termorezistență). Termorezistența este realizată sub forma unei bobine dintr-un conductor subțire de cupru sau platină a cărei rezistență crește cu temperatura. Această bobină izolată și protejată, formează traductorul de temperatură ce se introduce în mediul a cărei temperatură trebuie măsurată. La diferite temperaturi, rezistența R_θ a traductorului are diferite valori.

Din schemă se constată că curentul i_2, determinat de sursa de tensiune E, parcurge spirele bobinei II a logometrului care are rezistența r și rezistența R_θ a traductorului. Conform legii lui Ohm, intensitatea curentului i_2 este:

$$i_2 = \frac{E}{R_\theta + r}, \tag{232}$$

Curentul i_1 este determinat tot de sursa E, dar parcurge numai rezistența r a bobinei I, deci:

$$i_1 = \frac{E}{r} \tag{233}$$

Unghiul de deviație a acului în acest caz este:

$$\alpha = K \frac{i_1}{i_2} = K \frac{R_\theta + r}{r} \tag{234}$$

Deoarece rezistența R_θ este proporțională cu temperatura θ, înseamnă că scara aparatului poate fi gradată direct în unități de temperatură, °C.

Scanned with OKEN Scanner

d. Compensatoare electrice

În practică, pentru măsurări prin metode de compensaţie, se folosesc aparate speciale, numite compensatoare. Compensatorul electric se foloseşte pentru măsurarea cu precizie a tensiunilor continue de valori mici. În figura 234 este reprezentată schema de principiu a unui compensator manual. El se compune dintr-o rezistenţă R cu cursor (potenţiometru) alimentată de la o sursă de curent continuu E. În serie cu rezistenţa R sînt conectate rezistenţa de control R_c şi rezistenţa de ajustare R_a.

Curentul care se stabileşte în acest circuit serie este:

$$i = \frac{E}{R + R_c + R_a} \tag{235}$$

Rezistenţa dintre capătul A al potenţiometrului şi cursor r_x este proporţională cu deplasarea x a cursorului, devenind egală cu R, cînd cursorul se găseşte la celălalt capăt B al potenţiometrului.

Între borna A şi cursor există o cădere de tensiune (cu polaritatea + la borna A şi cu — la cursor):

$$U_x = i_0 \cdot r_x \tag{236}$$

Această tensiune se compară cu tensiunea de măsurat U, aplicată între bornele I şi II. Tensiunea U poate fi obţinută de exemplu, de la un traductor de temperatură (de exemplu, termocuplu). La bornele galvanometrului G se aplică astfel diferenţa tensiunilor U şi U_x (cele două tensiuni sînt înseriate ca în figură). Dacă cele două tensiuni sînt egale, galvanometrul indică zero. Galvanometrul avînd gradaţia zero la mijloc, el indică valori negative cînd $U < U_x$ şi valori pozitive cînd $U > U_x$.

Se constată că diferitelor poziţii ale cursorului le corespund diferite valori ale tensiunii U_x, cînd la bornele I şi II se conectează o tensiune necunoscută U; pentru determinarea valorii acesteia, se procedează astfel: se observă deviaţia acului indicator al galvanometrului şi se deplasează cursorul potenţiometrului pînă cînd galvanometrul indică zero; în dreptul cursorului şi se citeşte valoarea tensiunii $U_x = U$.

Deoarece $U_x = r_x \cdot i_0$, scara trasată se menţine aceeiaşi dacă i_0 se menţine constant. Dacă, de exemplu, tensiunea sursei E scade la jumătate, scade şi curentul i_0 la jumătate. În acest caz, cînd cursorul se găseşte în dreptul diviziunii 2 mV de pe scară, tensiunea U_x culeasă între punctul A şi cursor este de fapt de 1 mV. Pentru a evita astfel de erori, curentul trebuie verificat şi corectat înainte de începerea măsurării. Verificarea se face prin trecerea comutatorului K pe poziţia 2. Prin aceasta la bornele galvanometrului se aplică diferenţa dintre căderea de tensiune pe rezistenţa de control R_c şi tensiunea elementului normal E_N. Elementul normal este

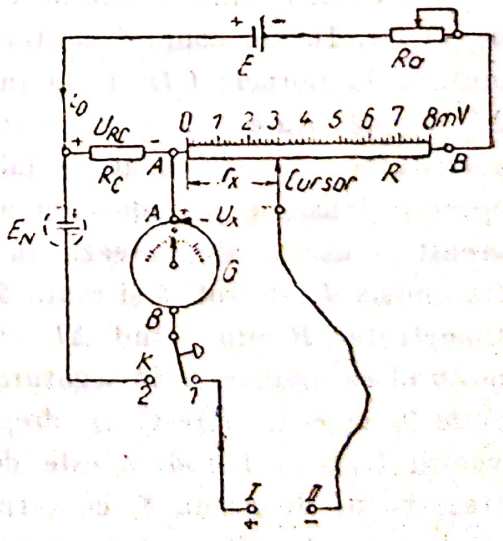


Fig. 234. Compensator manual.

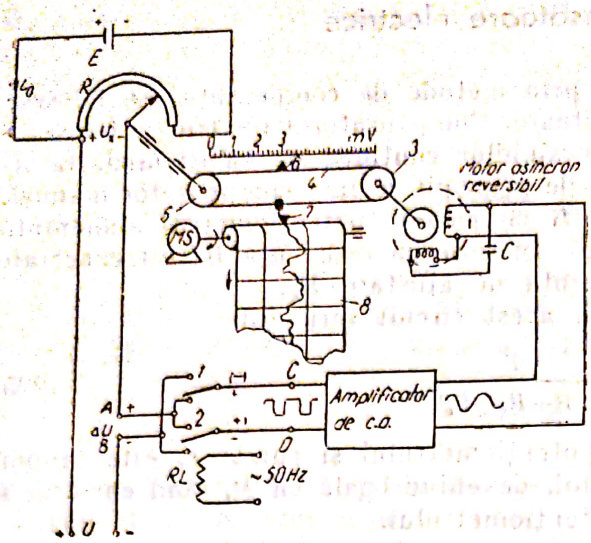


Fig. 235. Schema de principiu a compensatorului automat.

un etalon de tensiune, numit și element Weston, de 1,01855··· 1,01875 V la temperatura de 20°C. Este o sursă foarte stabilă în timp.

Tensiunea de control:

$$U_{RC}=i_0 \cdot R_C \qquad (237)$$

rămîne constantă cînd curentul este constant și egală cu tensiunea elementului normal Weston E_N:

$$U_{RC}=E_N \qquad (238)$$

Dacă galvanometrul deviază de la „0" la trecerea comutatorului pe poziția 2 înseamnă că s-a modificat tensiunea E și respectiv curentului i_0. Readucerea curentului i_0 la valoarea sa nominală se face prin modificarea poziției cursorului rezistenței, de ajustare a curentului, R_a pînă cînd galvanometrul indică zero. După verificarea și ajustarea curentului i_0 se trece din nou comutatorul k pe poziția *1* și se pot efectua măsurările.

Compensatoarele automate funcționează în principiu ca și cele manuale, cu deosebirea că modificarea poziției cursorului potențiometrului R (pînă cînd tensiunea U_x devine egală cu tensiunea de măsurat U) se face automat, fără intervenția omului. În acest caz, diferența $\Delta U=U_x-U$ nu mai este aplicată galvanometrului, ci la intrarea unui vibrator (între bornele A și B), care transformă tensiunea continuă ΔU într-o tensiune alternativă. Schema de principiu a unui compensator automat este reprezentată în figura 235.

Vibratorul poate fi de exemplu, un releu cu două contacte comutatoare *1* și *2* a cărui bobină de excitație R_L este alimentată cu tensiunea alternativă de 50 Hz. Releul comută contactele 1 și 2 cu frecvența de 50 Hz. Prin comutare, la bornele CD de la intrarea amplificatorului, se aplică tensiunea ΔU cu polaritate $+$, $-$ în cazul poziției inferioare a contactelor lor și cu polaritatea $-$, $+$ în cazul celeilalte poziții. Astfel, la intrarea amplificatorului apare o tensiune periodică cu amplitudinea U. După ce este amplificată această tensiune alimentează un motor asincron ce acționează roată *3*. Prin transmisia *4* este rotită și roata *5* și în acest fel se deplasează cursorul potențiometrului R pînă cînd $\Delta U=0$, adică $U_x=U$; în momentul echilibrării, motorul se oprește. Prin legătura de transmisie *4* este deplasat și acul indicator *6* care se oprește în dreptul diviziunii de pe scara corespunzătoare valorii $U_x=U$. Totodată este deplasată și o peniță înregistratoare *7* care trasează pe diagrama *8*, cu cerneală, variația tensiunii U. Banda de hîrtie se deplasează uniform (cu viteză constantă de circa 2 cm/oră), fiind antrenată de motorul sincron MS.

3. MĂSURAREA PUTERILOR

În curent continuu, puterea consumată într-un circuit fiind egală cu produsul dintre intensitatea curentului care circulă prin circuit și tensiunea aplicată la borne, valoarea sa se poate afla înmulțind indicația I a unui ampermetru montat în serie în circuit, cu indicația U a unui voltmetru montat în derivație, adică:

$$P_m = U \cdot I \tag{239}$$

Schema se poate realiza fie în montaj aval (fig. 236, *a*), fie în montaj amonte (fig. 236, *b*).

Din cauza consumului propriu al celor două aparate de măsurat, ambele montaje dau o eroare sistematică de metodă.

De aceea, pentru determinarea puterii efective P consumată în receptor trebuie să se corecteze puterea măsurată P_m dată de produsul indicațiilor ampermetrului și ale voltmetrului, scăzîndu-se din ea puterea consumată de voltmetru.

$$p_v = U \cdot I_v = \frac{U_2}{R_v} \tag{240}$$

în montajul aval:

$$P = U \cdot I_R = P_m - P_v = U \cdot I - \frac{U_2}{R_v} \tag{241}$$

sau de ampermetru,

$$p_A = R_A \cdot I^2 \tag{242}$$

în montajul amonte:

$$P = U_R \cdot I = P_m - p_A = U \cdot I - R_A \cdot I^2, \tag{243}$$

în care R_A și R_v sînt rezistențele ampermetrului și voltmetrului, I_v curentul prin voltmetru, iar I_R și U_R curentul și respectiv căderea de tensiune în receptor.

Eroarea sistematică de metodă este importantă numai în cazul măsurării puterilor mici, de același ordin de mărime cu puterile consumate de aparatele de măsurat. În celelalte cazuri, care sînt cele mai întîlnite în măsurările de puteri, această eroare este mică și se neglijează.

Wattmetrul electrodinamic. Pentru măsurarea directă a puterii se utilizează wattmetrul de tip electrodinamic (în curent continuu și curent alterna-

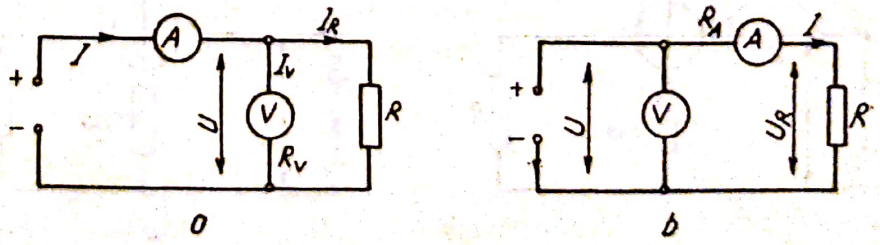


Fig. 236. Schema de măsurare a puterii cu ampermetrul și voltmetrul.

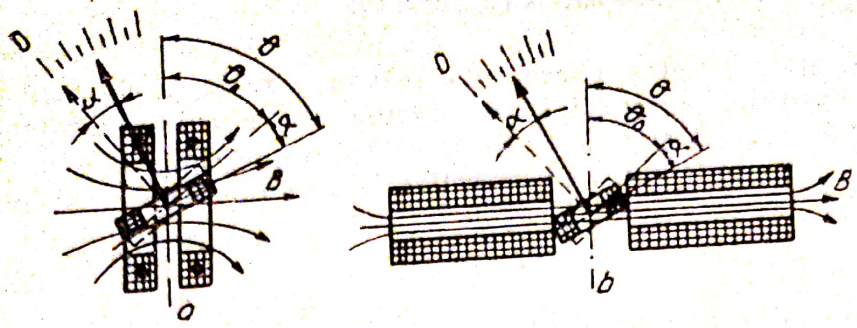


Fig. 237. Schema dispozitivului de măsurat electrodinamic.

tiv). Wattmetrele electrodinamice sînt dispozitive de măsurat electrodinamice cu cîmp radial ale căror derivaţii sînt proporţionale în curent continuu cu produsul curenţilor prin bobina fixă şi cea mobilă. În figura 237 este reprezentată schema dispozitivului de măsurat electrodinamic.

Bobinele dispozitivului de măsurat electrodinamic nu se leagă între ele, ci formează circuite independente, schemele de conectare a wattmetrului fiind date în figura 238.

Bobina fixă se conectează în serie cu circuitul de măsurat, prin ea trecînd curentul de sarcină I şi formînd *circuitul de curent* în bobina mobilă în serie cu o rezistenţă adiţională R_{ad} se conectează în paralel la circuitul de măsurat, aplicîndu-i-se astfel tensiunea reţelei U şi formînd *circuitul de tensiune*. În felul acesta prin cele două bobine trec curenţi diferiţi:

$$I_1 = I \text{ şi } I_2 = \frac{U}{R_2} \tag{244}$$

unde R_2 este rezistenţa circuitului de tensiune. Derivaţia wattmetrului electrodinamic va fi în acest caz:

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 \cdot I_2 = \frac{1}{D} I \frac{U}{R_2} = K \cdot P, \tag{245}$$

adică este proporţională cu puterea dată de tensiunea aplicată circuitului de tensiune şi de curentul care trece prin bobina de curent a dispozitivului de măsurat. Scara wattmetrului electrodinamic este uniformă.

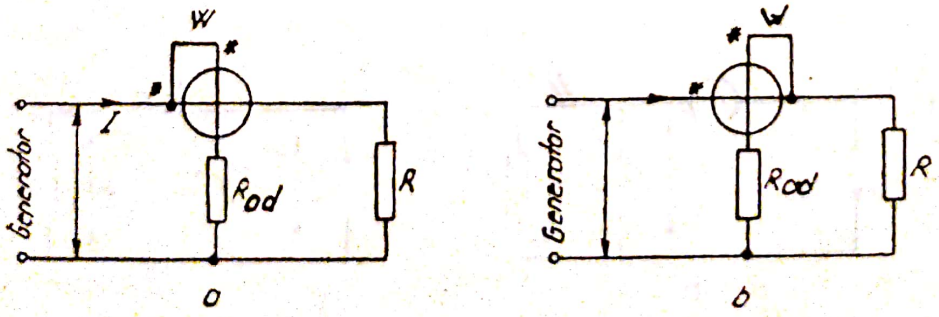


Fig. 238. Schemele de conectare a wattmetrului electrodinamic.

Bobina fixă (de curent) a wattmetrului este alcătuită dintr-un număr mic de spire de secţiune mare, iar bobina mobilă (de tensiune) dintr-un număr mare de spire de sîrmă subţire.

La conectarea wattmetrului în circuit trebuie respectat sensul curenţilor în bobine. Inversarea sensului curentului în una din bobine provoacă schimbarea sensului forţelor de acţiune reciprocă şi a sensului de derivaţie a bobinei mobile. De aceea bornele bobinelor care se conectează la sursa de alimentare (bornele de intrare) se notează pe aparate cît şi pe schemă printr-un asterisc(*).

Rezistenţa adiţională se conectează în circuitul de tensiune totdeauna după bobina mobilă, în partea dinspre sarcină.

4. MĂSURAREA REZISTENŢELOR

Pentru măsurarea rezistenţelor se aplică metode care depind de specificul şi mărimea rezistenţei de măsurat, de precizia urmărită şi de aparatele de măsurat utilizate. Cele mai uzuale sînt metodele de măsurare în curent continuu. Pentru măsurări de precizie se folosesc metodele de punte sau de compensaţie, iar pentru măsurări industriale metoda ampermetrului şi a voltmetrului sau ohmetre electrice şi electronice.

a. Măsurarea rezistenţei prin metode de punte

Metodele de punte sînt metodele de compensaţie de zero. Circuitul de măsurare al metodelor de punte (cunoscut de obicei sub numele de „punte") se compune din patru rezistenţe care formează laturile unui patrulater închis, un aparat indicator de zero legat într-una din diagonalele punţii şi sursa de alimentare conectată în cea de-a doua diagonală. Principiul metodelor de punte constă în echilibrarea electrică a punţii care se caracterizează prin lipsa curentului în diagonala aparatului de zero. Valoarea mărimii de măsurat rezultă din condiţia de echilibru a punţii în funcţie de rezistenţele cunoscute din laturile patrulaterului. Metodele de punte au o sensibilitate şi precizie mare de măsurare, nefiind influenţate de etalonarea aparatului de zero şi de variaţiile sursei de alimentare.

Puntea Wheatstone. Puntea Wheatstone (fig. 239) este alcătuită din trei rezistenţe cunoscute R_1, R_2, R_3, care împreună cu rezistenţa necunoscută R_x formează laturile patrulaterului ABCD, un galvanometru de curent continuu ca aparat de zero într-una din diagonalele patrulaterului, iar în cealaltă diagonală o sursă de curent continuu (de 1,5—4 V) şi o rezistenţă r pentru limitarea curentului în circuit.

Echilibrarea electrică a punţii Wheatstone se realizează prin variaţia rezistenţelor cunoscute din laturile patrulaterului, pînă ce curentul din diagonala

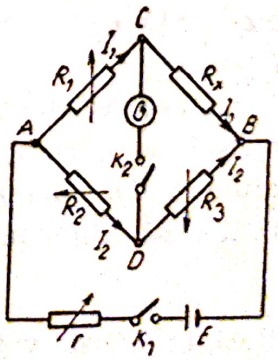


Fig. 239. Schema punţii Wheatstone.

galvanometrului devine egal cu zero. Aceasta va corespunde egalității potențialelor în punctele C și D, la care este conectat galvanometrul G. Această situație (egalitatea potențialelor în punctele C și D) este posibilă numai în cazul cînd căderile de tensiune în brațele AC și AD și respectiv, în brațele CB și DB sînt egale, adică:

$$U_{CB}=U_{DB} \text{ și } U_{AD}=U_{AC} \tag{246}$$

Cu notațiile din figura 239 relațiile de mai sus devin:

$$I_1R_x=I_2R_3 \text{ și } I_1R_1=I_2R_2 \tag{247}$$

Făcîndu-se raportul relațiilor (247) se obține condiția de echilibru a punții Wheatstone:

$$\frac{R_2}{R_3}=\frac{R_1}{R_x} \tag{248}$$

sau

$$R_1R_3=R_2R_x \tag{249}$$

După cum se observă, condiția de echilibru a punții depinde numai de cele patru rezistențe din brațe, fiind independentă de rezistențele interne ale sursei de curent și ale aparatului indicator de zero (galvanometrului G). Din condiția de echilibru rezultă valoarea rezistenței de măsurat:

$$R_x=\frac{R_1}{R_2}R_3 \tag{250}$$

Deci, condiția de echilibru poate fi enunțată astfel: produsul rezistențelor din brațele opuse trebuie să fie egale. Dacă puntea se alimentează în curent alternativ, condiția de echilibru este aceeași ca și în cazul alimentării în curent continuu. Puntea electrică se mai folosește și pentru măsurarea altor mărimi fizice, dacă în prealabil variațiile mărimilor respective sînt convertite în variații ale unor rezistențe electrice. Această convertire se realizează cu ajutorul traductoarelor. În figura 240 este prezentată schema unei punți care are conectat în brațul BD un traductor rezistiv de temperatură (a cărei rezistență R_θ variază cu temperatura θ a mediului în care este introdus traductorul).

Dacă rezistențele R din brațele AC și AD sînt cunoscute, iar valoarea rezistenței R_p din brațul CB poate fi modificată pînă la echilibrarea punții, atunci valoarea rezistenței necunoscute R_θ (variabilă cu temperatura) poate fi dedusă din condiția de echilibru:

$$RR_\theta-RR_p=0, \text{ deci } R_\theta=R_p \tag{251}$$

Deci, la diferite valori ale temperaturii θ, cursorul rezistenței variabile (potențiometrului) R_p trebuie deplasat în diverse poziții pentru ca puntea să rămînă în echilibru. Valoarea nulă a tensiunii U_{CB} este pusă în evidență de galva-

Scanned with OKEN Scanner

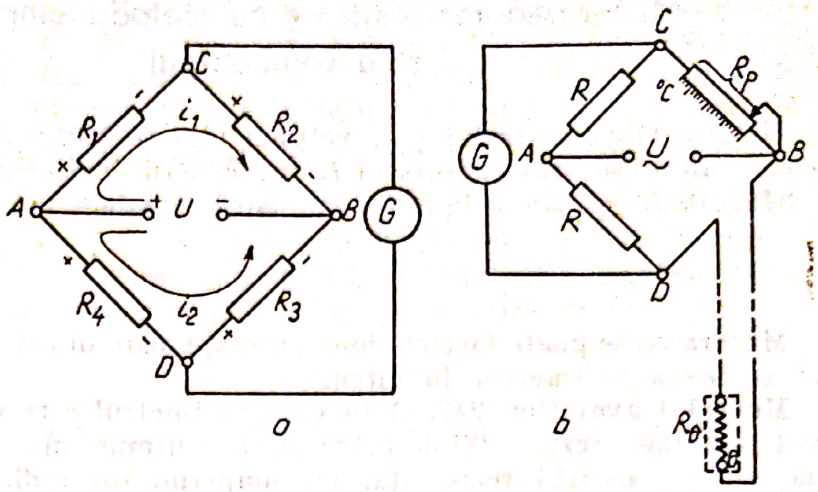


Fig. 240. Schema punţii electrice:
a — schema de principiu; *b* — schema pentru măsurarea temperaturii.

nometrul *G*. În dreptul cursorului se pot trasa diviziuni ce indică valoarea temperaturii θ (sau a rezistenţei R_θ), obţinînd astfel un aparat pentru măsurarea temperaturii prin echilibrarea manuală a punţii.

Puntea automată se deosebeşte de cea manuală prin faptul că echilibrarea se face automat. Din acest punct de vedere se aseamănă cu compensatorul automat. În figura 241 este prezentată schema de principiu a unei punţi automate. Puntea este alimentată cu tensiunea alternativă *U*, astfel încît tensiunea de echilibru U_{CD} este tot o tensiune alternativă care se amplifică şi se transmite unui motor reversibil asincron *M*. Motorul rotindu-se, modifică poziţia cursorului C pînă cînd este îndeplinită condiţia de echilibru.

$$r_1 R_3 = R_\theta r_2 \qquad (252)$$

Rezultă că diferitelor valori ale rezistenţei R_θ, respectiv diferitelor temperaturi, le corespund diferite poziţii ale cursorului. Simultan cu deplasarea cursorului prin transmisia cinematică *T* se depiasează şi un ac indicator care pe scara gradată în °C, indică valoarea temperaturii.

Toate aceste aparate pot fi echipate cu contacte electrice ce sînt comutate atunci cînd acul indicator depăşeşte anumite limite prestabilite. Aceste contacte sînt folosite pentru acţionarea elementelor de semnalizare în cadrul sistemelor de control al mărimilor respective.

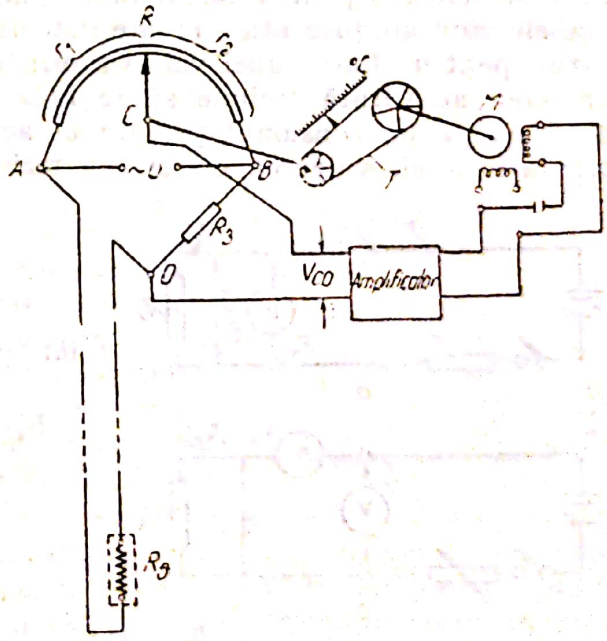


Fig. 241. Schema de principiu a punţii automate.

b. Măsurarea rezistențelor cu metoda ampermetrului și a voltmetrului

Metoda ampermetrului și a voltmetrului se bazează pe legea lui Ohm și constă în măsurarea curentului I_x și a căderii de tensiune U_x pe rezistența de măsurat R_x și din determinarea valorii acesteia din raportul:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} \tag{253}$$

Măsurarea se poate face cu două montaje, care diferă între ele prin modul cum se leagă voltmetrul în circuit.

Montajul aval (fig. 242, *a*) în care voltmetrul este montat în derivație direct la bornele rezistenței de măsurat și ca urmare măsoară căderea de tensiune U_x pe această rezistență, iar ampermetrul indică atît intensitatea curentului I_x care trece prin rezistența de măsurat R_x cît și intensitatea curentului $I_v = \frac{U}{R_v}$, absorbit de voltmetru (R_v fiind rezistența internă a voltmetrului);

Montajul amonte (fig. 242, *b*) în care voltmetrul este montat la borna de intrare a ampermetrului și la borna de ieșire a rezistenței de măsurat, măsurînd astfel atît căderea de tensiune U_x pe această rezistență cît și căderea de tensiune $U_A = R_A I$, pe ampermetru (R_A fiind rezistența internă a ampermetrului), iar ampermetrul măsoară curentul I_x care trece prin rezistența R_x.

Rezistența de măsurat R_x fiind determinată de raportul dintre căderea de tensiune U_x de la bornele sale și curentul I_x care trec prin ea $\left(R_x = \frac{U_x}{I_x}\right)$ și dacă se folosesc pentru calcul indicațiile U și I ale aparatelor de măsurat, ambele montaje prezintă o eroare sistematică de metodă. De aceea în ambele cazuri pentru aflarea unei valori a rezistenței măsurate cît mai apropiată de valoarea adevărată trebuie să se facă corectarea rezultatelor obținute ținînd seama de consumul propriu al aparatelor de măsurat. Astfel pentru montajul aval, valoarea efectivă a rezistenței se determină cu relația:

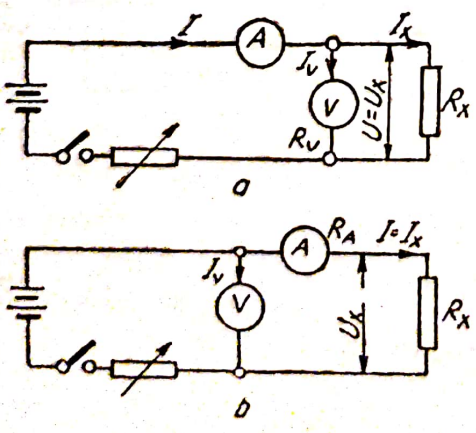


Fig. 242. Schemele de măsurare a rezistențelor prin metoda ampermetrului și a voltmetrului.

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} \tag{254}$$

iar pentru montajul amonte:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U - R_A I}{I} = \frac{U}{I} - R_A \tag{255}$$

Eroarea sistematică relativă este determinată de raportul dintre rezistența de măsurat și valoarea rezistențelor interne ale aparatelor folosite; ea este cu atît mai mică în cazul montajului aval cu cît rezistența de măsurat R_x

este mai mică în comparaţie cu rezistenţa R_v a voltmetrului, iar în cazul montajului amonte, cu cît rezistenţa de măsurat R_x este mai mare în comparaţie cu rezistenţa R_A a ampermetrului. Rezultă că atunci cînd nu se cunosc rezistenţele interne ale aparatelor de măsurat pentru a se obţine o valoare măsurată $R_m = \frac{U}{I}$ mai apropiată de valoarea adevărată, rezistenţele mici (sub 1 Ω) se măsoară cu montajul aval, iar rezistenţele mijlocii (pînă la 10^5 Ω) şi mari (peste 10^6 Ω), cu montajul amonte. Precizia măsurării rezistenţelor prin metoda ampermetrului şi voltmetrului este eliminată de erorile aparatelor utilizate; de obicei ea este mai mică de 1%.

c. Măsurarea rezistenţelor cu aparate indicatoare

Aparatele folosite pentru măsurarea directă a rezistenţelor se numesc ohmmetre sau megohmmetre. Principiul lor de funcţionare se bazează pe aplicarea legii lui Ohm. Ohmmetrele se compun dintr-o sursă de curent continuu şi un aparat indicator magnetoelectric. Constructiv, se deosebesc două categorii de ohmmetre:

— ohmmetre ale căror indicaţii depind de tensiunea sursei de alimentare,

— ohmmetre ale căror indicaţii nu depind de tensiunea sursei de alimentare.

Ohmmetrele ale căror indicaţii depind de tensiunea sursei de alimentare au ca aparat indicator un aparat magnetoelectric obişnuit, care poate fi un ampermetru sau un galvanometru (aparate ale căror indicaţii variază cu tensiunea la bornele sursei). Acestea pot fi executate cu montaj în serie sau cu montaj în paralel, diferenţa dintre ele constînd doar în modul în care este legată rezistenţa de măsurat faţă de aparatul indicator.

Ohmmetrul cu montaj în serie are aparatul indicator legat în serie cu rezistenţa de măsurat R_x şi cu o rezistenţă adiţională R (fig. 243, *a*). Cînd bornele B_1 şi B_2 ale ohmmetrului sînt scurtcircuitate prin intermediul comutatorului K, aparatul indicator va avea deviaţia maximă şi deci scara aparatului gradată în ohmi are sens invers. Pentru măsurarea unei rezistenţe cu acest ohmmetru în primul rînd se scurtcircuitează bornele aparatului, închizînd întrerupătorul K, apoi se aduce acul la gradaţia zero a scării, cu ajutorul unui şunt magnetic al aparatului. Se leagă rezistenţa de măsurat la bornele ohmmetrului şi se citeşte valoarea în ohmi pe scara gradată a aparatului. Cînd în urma variaţiei şuntului, acul nu se poate aduce la zero, bateria trebuie schimbată. Ohmmetrul cu montaj în serie se utilizează la măsurarea rezistenţelor mari.

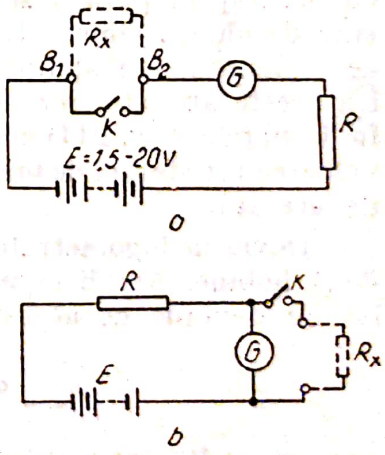


Fig. 243. Schemele ohmmetrelor ale căror indicaţii depind de tensiunea sursei de alimentare:
a — montaj în serie; *b* — montaj în paralel.

Ohmmetrul cu montaj în paralel (fig. 243, *b*) are aparatul indicator legat în paralel cu rezistenţa de măsurat. Spre deosebire de montajul

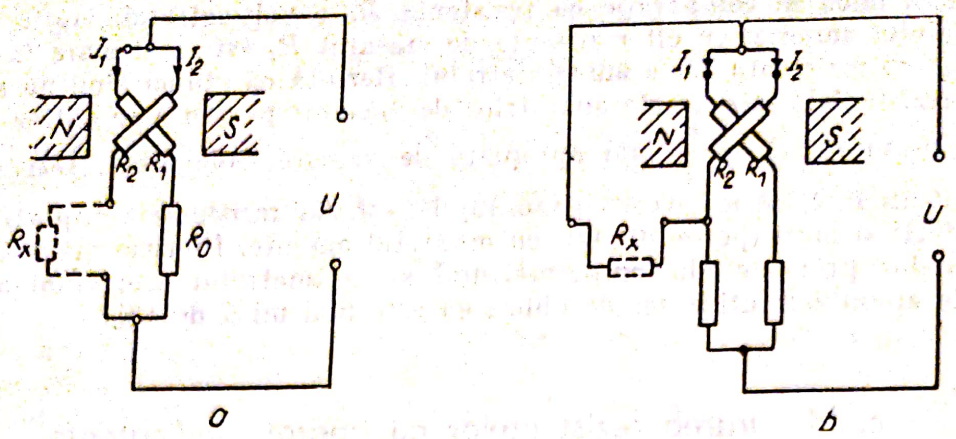


Fig. 244. Schemele ohmmetrelor ale căror indicații nu depind de tensiunea sursei de alimentare:

a — conectarea rezistenței de măsurat în serie; *b* — conectarea rezistenței de măsurat în paralel.

în serie, în acest caz aparatul indicator are deviația maximă (diviziunea ∞) cînd rezistența de măsurat are valoarea infinită, adică atunci cînd la bornele aparatului nu este conectată nici o rezistență și deci tot curentul trece prin aparatul de măsurat. Indicația zero a aparatului corespunde valorii zero a rezistenței de măsurat, adică atunci cînd bornele aparatului sînt scurtcircuitate.

În consecință, scara aparatului, gradată în ohmi, are sensul normal. Măsurarea rezistențelor cu ohmmetrul cu montaj în paralel se face în același mod ca și în cazul ohmmetrului cu montaj în serie. Reglarea aparatului se efectuează cu întrerupătorul K deschis, aducînd acul galvanometrului la diviziunea ∞ a scării, cu ajutorul șuntului magnetic al aparatului. Ohmmetrul cu montaj în paralel se folosește la măsurarea rezistențelor mici (zeci sau sute de ohmi). Ohmmetrele ale căror indicații nu depind de tensiunea sursei de alimentare au aparatul indicator de tipul logometrelor magnetoelectrice. La aceste aparate, rezistența de măsurat R_x care se conectează fie în serie, fie în paralel (fig. 244) cu una din bobinele mobile ale logometrului depinde de valoarea rezistenței de măsurat, curentul prin cealaltă bobină fiind independent de aceasta.

Deviația logometrului este determinată de raportul curenților prin cele două bobine. Ambii curenți fiind proporționali cu tensiunea sursei, raportul lor nu depinde de aceasta:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_x}{R_1 + R_0}\right) = f(R_x) \qquad (256)$$

unde R_1 și R_2 sînt rezistențele bobinelor mobile și R_0 o rezistență de protecție. Indicațiile ohmmetrului sînt deci funcție numai de rezistența de măsurat, fiind independente de tensiunea sursei. Ca urmare, aceste ohmmetre nu necesită nici o reglare prealabilă a măsurării. Ohmmetrele cu montaj în paralel se folosesc pentru măsurarea rezistențelor mici, iar cele cu montaj în serie pentru măsurarea rezistențelor mari (de ordinul megohmilor), din care cauză se mai numesc și megohmmetre.

Scanned with OKEN Scanner

5. MĂSURAREA MĂRIMILOR MAGNETICE

Măsurarea mărimilor magnetice este strîns legată de măsurarea mărimilor electrice, această legătură rezultînd din interdependența fenomenelor electrice și magnetice, componente ale aceluiași proces electromagnetic. La determinarea caracteristicilor magnetice ale materialelor feromagnetice, aproape totdeauna ca rezultat al măsurării se obține o mărime electrică sau un parametru electric al materialului de încercat, cu ajutorul căruia folosind apoi relațiile cunoscute între mărimile electrice și magnetice se calculează ultimele. În general în măsurile magnetice se măsoară fluxul magnetic cu ajutorul căruia se determină prin calcul celelalte mărimi și caracteristici magnetice (inducția, intensitatea cîmpului magnetic, curba de magnetizare etc.).

a. Măsurarea fluxului magnetic

Pentru măsurarea fluxului magnetic se poate folosi un aparat numit fluxmetru (fig. 245). Fluxmetrul este un aparat de tip magnetoelectric destinat măsurării directe a fluxului magnetic.

Aparatul se compune dintr-o bobină mobilă B_f suspendată pe pivoți, care se mișcă cu frecări foarte mici în lagăre cu pietre prețioase; curentul este adus cu ajutorul a două fire metalice extrem de fine și suple formînd bucle largi. Ambele bobine, fixă și mobilă se află între polii N, S ai unui magnet permanent. Deoarece cuplul rezistent al bobinei mobile B_f este practic nul, în stare de repaus bobina B_f poate rămîne în echilibru în orice poziție și deci acul indicator se poate găsi în orice punct al scării.

Pentru măsurarea fluxului magnetic, fluxmetrul se conectează cu bobina de măsurat B_m. Cele două conductoare de legătură dintre fluxmetru și bobina de măsurat se răsucesc împreună, pentru a se evita formarea unei bucle prin care ar putea trece fluxuri parazite, care să influențeze măsurarea. Introducînd bobina în cîmpul magnetic de măsurat are loc variația de flux $\Delta\Phi$, în care se induce o forță electromotoare, proporțională cu variația de flux magnetic care o străbate. Forța electromotoare dă naștere unui curent în circuitul bobinei fluxmetrului B_f care se rotește. Rotirea se face pînă la o poziție la care variația fluxului $\Delta\Phi_f$ în bobina mobilă a fluxmetrului compensează variația fluxului în bobina de măsurat. Cîmpul magnetic în intrefierul fluxmetrului în care se găsește bobina mobilă fiind radial, variația fluxului total la rotirea acestuia cu un unghi α este:

$$n_f \cdot \Delta\Phi_f = n_f \cdot B \cdot S \cdot \alpha \qquad (257)$$

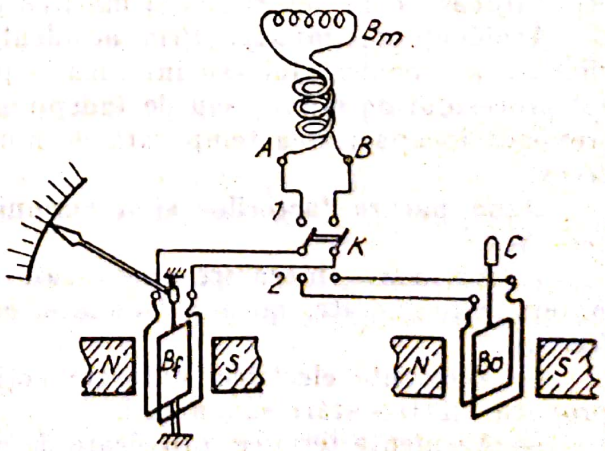


Fig. 245. Schema fluxmetrului.

La echilibru se poate scrie:

$$n\Delta\phi = n_f \Delta\phi_f = n_f \cdot B \cdot S \cdot \alpha, \tag{258}$$

de unde:

$$\Delta\phi = \frac{n_f \cdot B \cdot S}{n}\alpha = \frac{Cf}{n}\alpha, \tag{259}$$

în care: n_f și S sînt numărul de spire și secțiunea bobinei mobile a fluxmetrului;

B — inducția în intrefierul fluxmetrului;

$C_f = n_f \cdot B \cdot S$ — constanta fluxmetrului;

n — numărul de spire ale bobinei de măsurat.

Din relația (259) rezultă că deviația α a fluxmetrului este proporțională cu variația fluxului magnetic $\Delta\phi$ în bobina de măsurat, iar constanta sa C_f este independentă de valoarea rezistenței exterioare pe care se închide fluxmetrul.

Citirile indicațiilor fluxmetrului se fac cu mare precizie deoarece după ce a deviat, acul indicator rămîne pe loc. Pentru aducerea acului la diviziunea zero a scării, fluxmetrul este prevăzut cu un alt magnet între ai cărui poli se găsește o bobină auxiliară B_a. Punînd comutatorul K pe poziția *2* se rotește bobina auxiliară cu ajutorul corectorului C (scos pe capacul aparatului). La rotirea bobinei auxiliare, în circuitul bobinei fluxmetrului are loc variația fluxului magnetic, pentru compensarea căruia aceasta începe să se rotească într-o parte sau în alta, ceea ce permite să se aducă acul aparatului la gradația zero a scării.

6. MĂSURI DE PROTECȚIE A MUNCII

Protecția muncii este disciplina științifică care cuprinde legislația, tehnica securității și igiena muncii, avînd ca scop asigurarea celor mai bune condiții de muncă pentru prevenirea accidentelor de muncă și a îmbolnăvirilor profesionale.

Protecția muncii se asigură în principal prin mecanizarea complexă și automatizarea proceselor grele și cu volum mare de muncă, precum și prin organizarea rațională a procesului de producție și a locului de muncă, adică prin mijloace care determină și mărirea productivității muncii.

Accidente de muncă. Prin accident de muncă se înțelege vătămarea violentă a organismului sau intoxicația profesională acută petrecută în timpul procesului de muncă sau de îndeplinire a îndatoririlor de serviciu și care provoacă incapacitatea temporară de muncă cel puțin o zi, invaliditate sau deces.

După natura factorilor și a acțiunilor care provoacă accidentele, se deosebesc:

— Accidente mecanice, provocate de scule defecte, obiecte căzute, materiale prelucrate, mașini defectate, care produc: tăieturi, striviri, răniri, fracturi.

— Accidente electrice, datorate acțiunii curentului electric care poate provoca electrocutări sau arsuri.

— Accidente termice, provocate de obiecte sau materiale la temperaturi înalte, care produc arsuri, sufocări, șocuri termice.

Scanned with OKEN Scanner

— Accidente chimice, provocate de substanţe chimice de acţiune agresivă (acizi, baze) sau toxică, care produc arsuri chimice, intoxicaţii. Pentru prevenirea accidentelor de orice natură ar fi ele trebuie luate măsuri de tehnica securităţii muncii. Aceste măsuri depind de specificul de muncă, de condiţiile de lucru etc.

Accidentele electrice se produc prin acţiunea violentă şi vătămătoare a curentului asupra omului. Accidentele electrice pot fi:

— electrocutările, care sînt provocate de trecerea prin corpul omenesc, a unui curent electric de intensitate periculoasă. Prin electrocutare sînt vătămate organele interne.

— electrotraumatismele, care produc vătămări externe, ca: arsuri electrice, semne electrice, care apar prin contactul conductorului electric cu pielea, orbirea temporară sau definitivă ca urmare a arcului electric, căderea de la înălţime ca urmare a pierderii echilibrului sau cunoştinţei sub acţiunea unui şoc electric.

În afară de accidentele menţionate, curentul electric, poate provoca, prin supraîncălzirea conductoarelor sau prin arcuri electrice, incendii sau explozii. Electrocutarea este un accident foarte periculos, deoarece curentul electric ce străbate corpul acţionează asupra centrilor nervoşi şi a muşchilor inimii, putînd provoca, în cazuri grave oprirea respiraţiei, paralizia inimii şi moartea.

Accidentul electric se produce fulgerător înainte de a fi posibil orice reflex de apărare. La trecerea curentului electric, corpul omenesc opune o anumită rezistenţă, rezistenţă ce depinde de: umiditatea pielii, suprafaţa de contact a pielii cu electrozii prin care circulă curentul electric, tensiunea electrică. Pentru fixarea condiţiilor de securitate se iau în considerare curenţii şi tensiunea nepericuloasă care au valorile:

— curentul continuu pînă la 50 mA, curentul alternativ (cu frecvenţa de 50 Hz) pînă la 10 mA.

— tensiunea electrică de 40 V, pentru atingeri indirecte, 24 V pentru alimentarea utilajelor electrice şi de iluminat portative în încăperi cu condiţii periculoase.

Pentru a preîntîmpina accidentele de natură electrică se iau următoarele măsuri:

— izolarea electrică a conductoarelor electrice;

— carcasarea de protecţie, adică acoperirea elementelor sub tensiune cu o carcasă de obicei metalică;

— blocarea, pentru a interzice accesul la diferite elemente ale instalaţiilor aflate sub tensiune.

— folosirea tensiunilor reduse acolo unde este posibil;

— legarea la pămînt a utilajelor şi a echipamentelor electrice care pot intra accidental sub tensiune.

— folosirea mijloacelor individuale de protecţie: cleşti şi scule izolante pentru scoaterea de sub tensiune a maşinilor sau a echipamentelor electrice;

— disciplina la locul de muncă.

Accidente termice se produc în urma acţiunii vătămătoare a căldurii sau a frigului asupra organismului omenesc. Principalele forme de astfel de accidente sînt: arsurile, opăriturile, şocul termic, insolaţia etc.

Scanned with OKEN Scanner

Măsurile de combatere a acestor tipuri de accidente constau din:

— panouri izolante, care protejează pe muncitor de sursa de căldură (corpul panoului se execută din azbest sau aluminiu);

— ecrane umede, executate din fire textile, pe care curge apă în permanenţă;

— perdelele de apă, care absorb radiaţia calorică;

— izolarea termică a suprafeţelor calde cu materiale, ca: plută, fibre izolante sau vată minerală;

— echipament de protecţie, îmbrăcăminte de protecţie din azbest sau doc impregnat, ochelari de protecţie împotriva radiaţiei directe din cuptoare sau corpuri incandescente.

Accidentele chimice se produc în urma acţiunii vătămătoare a substanţelor chimice asupra organismului. După natura acţiunii lor vătămătoare, substanţele chimice pot fi toxice (otrăvitoare) şi iritante sau agresive (adică atacă pielea şi ţesuturile; de exemplu, acidul azotic, acidul sulfuric, hidroxidul de sodiu etc.). Substanţele chimice agresive atacă îndeosebi pielea, provocînd arsuri chimice, a căror gravitate depinde în primul rînd de întinderea acestora. Substanţele toxice pătrund în organism, provocînd intoxicaţii. Pentru prevenirea accidentelor chimice se iau o serie de măsuri. Măsura cea mai eficientă de prevenire a intoxicaţiilor şi a accidentelor chimice în general, constă în mecanizarea completă sau automatizarea proceselor de producţie, în care se folosesc substanţe chimice vătămătoare pentru a nu mai fi necesară prezenţa fizică a omului în locurile periculoase de muncă.

O altă măsură este raţionalizarea procesului tehnologic prin împiedicarea răspîndirii substanţelor toxice în atmosferă. În lipsa altor mijloace de prevenire, încăperile cu emanaţii toxice trebuie izolate de alte încăperi de lucru. Pereţii, pardoseala şi tavanul acestor încăperi trebuie executate din materiale care nu absorb substanţele toxice şi se pot curăţa uşor, şi să existe un sistem de ventilaţie. Lucrătorii trebuie să aibă echipament de protecţie corespunzător, şi să respecte cu stricteţe măsurile indicate de igienă. Pentru cunoaşterea normelor de tehnica securităţii muncii se prevăd instructaje de protecţie a muncii care au ca scop cunoaşterea de către lucrătorul respectiv a locului de muncă, al accidentelor posibile şi a modului de prevenire a lor, al echipamentelor de protecţie şi a modului de folosire în condiţiile locului de muncă respectiv.

E. MĂSURAREA PRESIUNII, A DEBITULUI ŞI A NIVELULUI

Întrucît în majoritatea proceselor tehnologice din industria chimică se prelucrează fluide, măsurarea presiunilor, a debitelor şi a nivelului acestora în instalaţii, constituie operaţii obligatorii pentru supravegherea desfăşurării acestor procese.

1. MĂSURAREA PRESIUNILOR

Prin presiune se înţelege forţa care acţionează pe unitatea de suprafaţă. Ea se măsoară în newtoni pe metru pătrat (N/m^2) sau în vechiul sistem de unităţi de măsură MKfS, în kilograme forţă pe centimetru pătrat (1 kgf/cm^2)=

$=1$ daN/cm^2. Măsurarea presiunii se realizează luînd ca referinţă presiunea exercitată de aerul atmosferic asupra scoarţei pămîntului. Presiunea exercitată de aerul atmosferic este egală cu presiunea exercitată (pe aceeaşi unitate de suprafaţă, de exemplu cm^2) de către o coloană de mercur înaltă de 0,760 m sau de către o coloană de apă înaltă de aproximativ 10 m. Această presiune este admisă ca unitate de măsură şi se numeşte atmosferă tehnică avînd simbolul at (at $=1$ Kgf/cm^2). Submultiplii atmosferei tehnice sînt: milimetri coloană apă şi milimetri coloană mercur (1 mm $H_2O=$ $=0{,}0001$ Kgf/cm^2; 1 mm Hg care se mai numeşte torr$=\frac{1}{760}$ at. Presiunile măsurate în raport cu presiunea atmosferică se numesc presiuni relative. Presiunea absolută este suma presiunii relative şi a presiunii atmosferice.

Dacă presiunea absolută este mai mică decît presiunea atmosferică, diferenţa lor se numeşte depresiune.

Pentru măsurarea depresiunilor se folosesc vacuumetre, iar a suprapresiunilor, manometre. Aparatele pentru măsurarea presiunii şi a depresiunii se clasifică după destinaţie şi după principiul de funcţionare, astfel:

— După destinaţie există trei grupe de aparate: etalon, de verificare şi de lucru. Aceste grupe de aparate se deosebesc prin precizia lor, prin stabilitatea în timp a parametrilor constructivi şi prin gradul de influenţă al factorilor exteriori asupra preciziei de măsurare.

— După principiul de funcţionare se deosebesc următoarele tipuri de aparate: cu lichid, cu elemente elastice şi electrice.

a. Manometre cu lichid

Funcţionarea acestor manometre se bazează pe fenomenul de echilibrare a presiunii măsurate cu presiunea unei coloane de lichid. Construcţia acestor aparate este simplă. Constructiv, manometrele pot fi cu tub de sticlă în formă de U, cu rezervor şi cu tub înclinat.

Manometrul cu tub de sticlă în formă de U (fig. 246). Manometrul cu tub U poate fi construit dintr-un tub de sticlă îndoit sub formă de U şi umplut cu un lichid (de obicei, Hg) mai dens decît mediul a cărei presiune se măsoară.

Tubul de sticlă este umplut pînă la jumătate din înălţimea sa cu lichid. Pentru măsurarea presiunii este necesar să se citească diferenţa de nivel h dintre suprafeţele libere ale lichidului din tub. Pentru măsurări de precizie mai mică mercurul se poate înlocui cu apa. Dacă un tub al manometrului este montat la recipientul a cărui presiune trebuie măsurată, iar celălalt tub comunică cu atmosfera, ecuaţia de echilibru dintre forţa exercitată de presiunea p_s şi greutatea lichidului evacuat este:

$$p_s = p - p_a = h \cdot \gamma \qquad (260)$$

în care p_s este suprapresiunea, în daN/cm^2;

p — presiunea absolută a lichidului;

p_a — presiunea atmosferică;

h — diferenţa de nivel;

γ — greutatea specifică a lichidului.

Scanned with OKEN Scanner

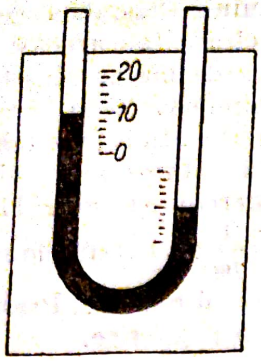


Fig. 246. Manometru cu tub de sticlă în formă de U.

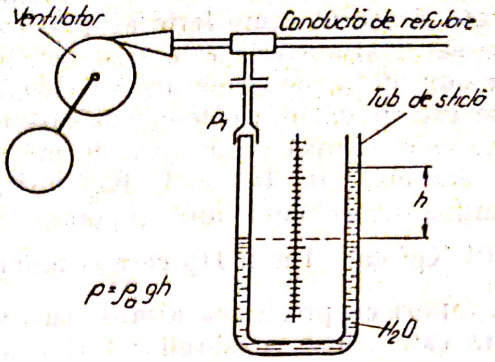


Fig. 247. Schema de conectare a manometrului cu tub în formă de U la conducta de refulare.

În figura 247 este reprezentată schema de conectare a manometrului cu tub în formă de U la conducta de refulare a unui ventilator (acționat de motorul *M*), pentru controlul suprapresiunii în această conductă. Deoarece presiunea p_1 este mai mare decît presiunea atmosferică, lichidul din tub se denivelează pînă cînd presiunea coloanei de apă (în tub este apă) devine egală cu presiunea p_1 din conductă. Deci, presiunea respectivă este de h milimetri coloană de apă (mm H_2O). Dacă manometrul este umplut cu mercur, se obține o denivelare mai mică h_1 ce reprezintă măsurarea presiunii p_1 în milimetri coloană mercur (mm Hg).

Manometrul de tip *U* poate măsura și presiuni diferențiale, adică diferența a două presiuni p_1 și p_2. În acest caz, în primul braț se aplică presiunea p_1, iar în celălalt presiunea p_2. Dacă tubul este umplut cu apă, denivelarea h din cele două brațe reprezintă valoarea (în milimetri coloană de apă) presiunii diferențiale $p=p_1-p_2$. Astfel de manometre cu tub *U* se produc la Întreprinderea „Automatica" din București.

Manometrul diferențial se folosește pentru măsurarea presiunilor diferențiale și se bazează tot pe denivelarea lichidului (mercurului) din două vase comunicante, sub acțiunea presiunii diferențiale (fig. 248). Vasele metalice *1* și *2* sînt de diametre diferite. Vasul în care se aplică presiunea mai mare se numește vas de plus (+), iar celălalt vas de minus (—). Sub acțiunea presiunii are loc o denivelare, care pusă în evidență cu ajutorul plutitorului, este proporțională cu presiunea diferențială:

$$p=p_1-p_2 \qquad (261)$$

Deplasarea plutitorului este transmisă sectorului dințat *4* și pinionului *5* care rotesc acul indicator pe scara aparatului. Manometre diferențiale de acest tip se construiesc la IAMC-Otopeni și Intreprinderea Automatica. În figura 249 este prezentat schematic un manometru diferențial prevăzut cu un ventil de egalizare V_3 și două ventile de izolare V_1 și V_2. În cazul deschiderii ventilului V_3, presiunea în cele două vase se egalează și acul indicator al manometrului revine la zero. Ventilele V_1 și V_2 pot fi manipulate numai în cazul în care V_3 este deschis, altfel aparatul se poate deteriora. La punerea în funcțiune, după deschiderea ventilelor V_1 și V_2 se închide treptat V_3. Baterii de astfel de ventile cu indicativul BR-1 sînt fabricate de *IEA*.

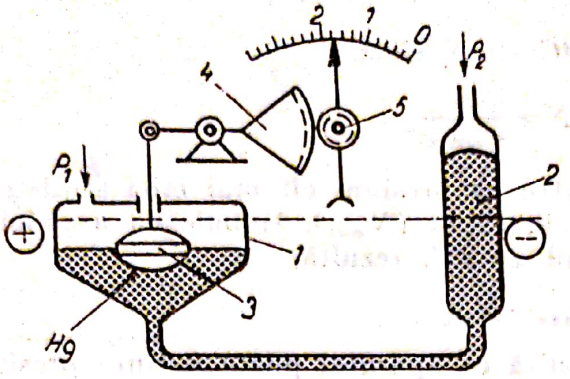


Fig. 248. Schema de principiu a manometrului diferențial cu plutitor.

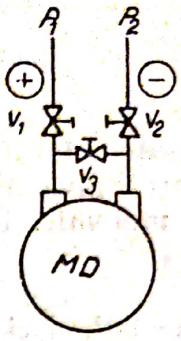


Fig. 249. Reprezentarea schematică a manometrelor diferențiale.

Manometrul cu tub înclinat se bazează pe același principiu ca și cel cu tub U, dar permite măsurarea presiunilor mici, fapt pentru care este denumit micromanometru. El este construit dintr-un vas metalic ce comunică cu un tub de sticlă înclinat față de orizontală cu un unghi α (fig. 250). În vas se găsește un lichid (de exemplu, apă). În cazul în care presiunea aplicată p_1 este cea atmosferică p_a, nivelul de lichid în vas și în tub este același (linia punctată AC), și pe scara aparatului se indică presiunea relativă zero. Dacă se aplică o presiune a unui gaz $p_1 > p_a$, nivelul de lichid crește în tub, iar în vas scade, diferența de nivel fiind h, iar dacă lichidul are greutatea specifică γ rezultă,

$$p_1 = \gamma \cdot h \tag{262}$$

Dacă se neglijează scăderea nivelului din vas, se poate considera $h \simeq BC$ și

$$p_1 \approx \gamma \cdot BC. \tag{263}$$

Din triunghiul ABC rezultă că:

$$BC = AB \cdot \sin \alpha \tag{264}$$

Dacă se exprimă deplasarea lichidului AB pe scara gradată în număr de diviziuni N, rezultă,

$$BC = N \cdot \sin \alpha \tag{265}$$

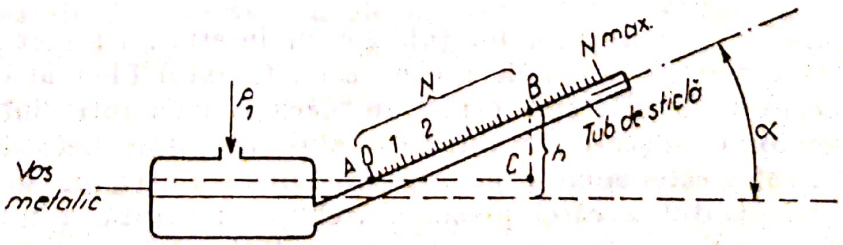


Fig. 250. Macromanometru cu tub înclinat.

Deci se pot scrie relaţiile:

$$p_1=\gamma BC=\gamma\cdot N\cdot\sin\alpha \tag{266}$$

$$N=\frac{p_1}{\gamma\sin\alpha}$$

Din aceste relaţii rezultă că, pentru ca presiuni cît mai mici să determine deplasarea nivelului în tub pînă la capăt (N_{max}), trebuie ca unghiul α să fie cît mai mic. De exemplu cînd $\alpha=90°$, rezultă:

$$p_{max}=N_{max} \tag{267}$$

Dacă $\alpha=30°$, deci sin $\alpha=0{,}5$, rezultă că aparatul poate măsura presiuni ce au valori maxime de două ori mai mici:

$$p_{max}=\gamma N_{max}\cdot\sin 30°=0{,}5\gamma N_{max} \tag{268}$$

Asemenea micromanometre pot măsura presiuni pînă la 0,5 mm H_2O. Tipul fabricat de Întreprinderea „9 Mai" din Ploieşti este MP—C—0,3.

b. Manometre cu elemente elastice

Aceste manometre se bazează pe deformarea unor elemente elastice sub influenţa presiunii. Aceste aparate sînt folosite într-un interval mare de presiuni: de la miimi de daN/cm² pînă la mii de daN/cm². Datorită faptului că manometrele cu elemente elastice sînt simple, portabile, şi cu un preţ de cost redus, ele sînt utilizate atît în laboratoare cît şi în industrie. Ca elemente elastice se folosesc membrane, burdufuri şi arcuri tubulare, îndoite sub formă de arc de cerc sau de curbă helicoidală.

Materialele utilizate pentru confecţionarea elementelor elastice trebuie să posede o mare elasticitate, o stabilitate în timp a parametrilor şi o rezistenţă mecanică corespunzătoare. Dintre manometrele cu elemente elastice cele mai utilizate sînt: manometrele cu burduf elastic şi manometrele cu arc tubular.

Manometrele cu burduf elastic se folosesc la măsurarea presiunilor cuprinse între 0,5 şi 5 daN/cm². La aceste manometre, elementul elastic este un arc în formă de burduf (fig. 251).

Deplasarea capătului liber al burdufului este direct proporţională cu presiunea aplicată şi se transmite unui ac indicator care indică o gradaţie corespunzătoare. Scara manometrului este gradată în unităţi de presiune.

Manometrele cu arc tubular sînt cele mai folosite în măsurările de laborator şi industriale (fig. 252).

Arcul tubular *1* reprezintă un tub gol în interior, cu secţiunea ovală sau eliptică şi îndoit în formă de arc de cerc. Capătul liber al elementului elastic este legat de o tijă, care printr-un mecanism cu roţi dinţate sau cu pîrghii transmite o mişcare de rotaţie acului indicator. Celălalt capăt al elementului elastic este montat pe suportul aparatului *2* de unde se face legătura cu recipientul a cărei presiune trebuie măsurată. Cînd presiunea creşte, capătul liber al elementului elastic se deplasează şi devierea acului indicator este proporţională cu presiunea măsurată. Pentru mărirea sensibili-

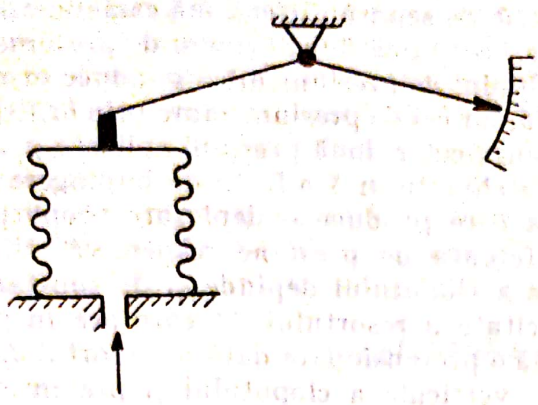


Fig. 251. Manometru cu burduf elastic.

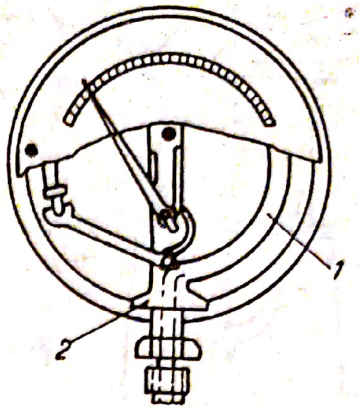


Fig. 252. Manometru cu arc tubular.

tăţii manometrelor cu arc tubular se folosesc arcuri tubulare elicoidale, cu ele obţinîndu-se un unghi mai mare de răsucire a capătului liber. Secţiunea tubului este necirculară, însă simetrică. Materialul din care este confecţionat arcul tubular se alege în funcţie de intervalul de presiune necesar a fi măsurat. Astfel, pentru presiuni între 0 şi 160 daN/cm² se foloseşte alama, iar pentru presiuni mai înalte oţelul.

c. Manometre electrice

Manometrele electrice sînt dispozitive de măsurat moderne folosite în special pentru măsurarea presiunilor şi care furnizează un semnal unificat din sistemul *E*. Deoarece manometrele electrice au în componenţa lor un element sensibil şi un adaptor care furnizează semnal unificat electric, ele se numesc traductoare de presiune. Cele mai multe traductoare de presiune se bazează pe principiul transformării presiunii într-o forţă sau într-o deplasare ce se măsoară prin metodele descrise anterior. Elementele sensibile ale acestor traductoare, independent de realizarea lor constructivă constau dintr-o suprafaţă pe care se exercită acţiunea presiunii care se măsoară. Rezultă astfel o forţă:

$$F = p \cdot A_{ef}. \tag{269}$$

în care p este presiunea, iar A_{ef}, suprafaţa efectivă asupra căreia acţionează presiunea.

Traductoarele de presiune cu clopot sînt folosite în general pentru măsurarea presiunilor mici (de ordinul zecilor de milimetri coloană de apă). Schema de principiu a unui asemenea traductor este prezentată în figura 253. Schema corespunde detectorului de presiune diferenţială cu clopot *EFL*-271, din sistemul unificat *E*, realizat de IEA. Detectorul este realizat într-o carcasă formată din patru elemente: corpul superior *9*, corpul inferior *13*, capacul superior *1* şi capacul inferior *18*. Carcasa are rolul de a adăposti mecanismele detectorului. Conţine şi o cameră de presiune, care este împărţită în două

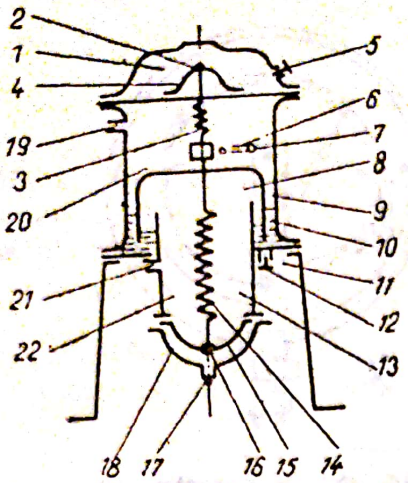


Fig. 253. Schema de principiu a traductorului cu clopot.

părți de clopotul *8*, etanșate de lichidul de umplere *10*. Se separă astfel două camere; camerele de presiune mică *20* și camera de presiune mare *22*. Fluidul de presiune mică se aduce prin orificiul *19*, iar cel de presiune mare prin orificiul *21*. Diferența celor două presiuni aplicate provoacă asupra clopotului *8* o forță de împingere de jos în sus care produce o deplasare proporțională cu diferența de presiune respectivă. Mișcarea în sus a clopotului depinde și de constanta de elasticitate a resortului *14* care are în poziția inițială o pretensionare dată de resortul *3*. Poziția pe verticală a clopotului și pretensionarea celor două resorturi sînt reglate cu ajutorul celor două șuruburi de reglare *2* și respectiv *16* (prin demontarea bușonului *17*).

Mișcarea de translație a clopotului este transformată cu ajutorul pîrghiei *6* într-o deplasare unghiulară care se transmite axului 7; acesta se cuplează cu adaptorul ELT-370. Traductorul poate fi folosit în mai multe domenii de măsurare: 0...25,0; 0...50; 0...100 mm H_2O cu o precizie de $\pm 0{,}5\%$.

Traductoarele cu tub Bourdon fiind robuste și precise în măsurare se utilizează tot mai mult. Se folosesc pentru măsurări de presiune în domenii largi, pînă la 100 daN/cm² cele obișnuite, și pînă la 300 daN/cm² cele cu construcție specială. IEA realizează traductorul de presiune statică AT-10-ELT-370, schema de principiu a detectorului AT-10 fiind reprezentată în figura 254.

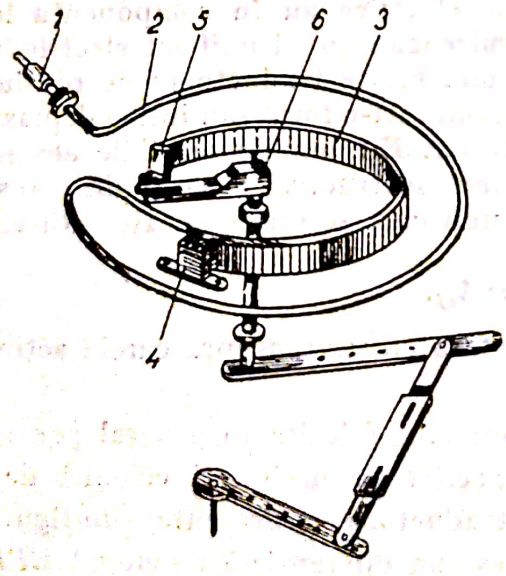


Fig. 254. Schema de principiu a detectorului AT-10:

1 — racord; *2* — conductă tampon; *3* — tub bourdon; *4* — suport; *5* — capăt mobil; *6* — pîrghia detectorului.

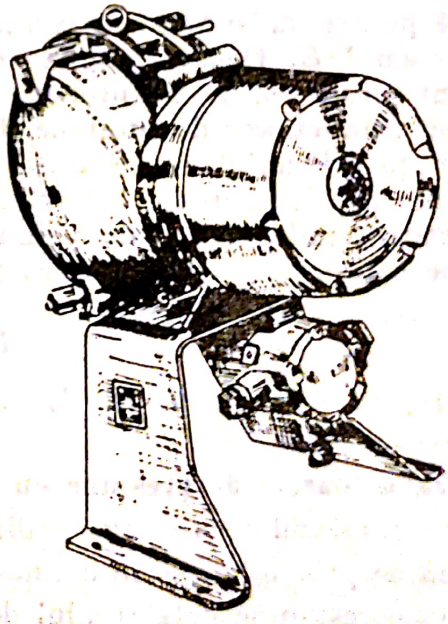


Fig. 255. Traductor de presiune diferențială AT-30, ELT-370.

Traductoarele cu burdufuri sînt folosite atît ca aparate indicatoare cît şi ca aparate înregistratoare sau de transmitere a mărimii măsurate la distanţă. Limitele de măsurare sînt relativ mici 1...5 daN/cm². În ţara noastră IEA realizează două tipuri de traductoare avînd ca elemente sensibile burdufuri: traductorul de presiune absolută AT-40, ELT-370, care asigură măsurarea presiunii absolute în limitele 0...50 mm coloană mercur (minim), 0...1 000 mm coloană mercur (maxim) cu o precizie de ±0,5% şi traductorul AT-30, ELT-370, prezentat în figura 255, care asigură măsurarea unor diferenţe de presiune în limitele 0...80 mm coloană de apă (min) şi 0,400 mm coloană apă (maxim) cu o eroare de ±0,5%.

2. MĂSURAREA DEBITULUI

Prin debit de fluid se înţelege cantitatea (numărul de Kg sau de m³) de fluid ce trece prin secţiunea unei conducte, în unitatea de timp. Dacă aria secţiunii conductei este S în metri pătraţi, iar viteza medie a fluidului W în metri pe oră, debitul în m³/h este

$$Q = W \cdot S \qquad (270)$$

Deci, pentru a se cunoaşte debitul, este suficient să se măsoare viteza W a fluidului şi secţiunea S a conductei. Pentru a se măsura viteza, se creează pe conductă rezistenţe hidraulice, prin micşorarea secţiunii conductei, ceea ce determină apariţia unor „căderi dinamice de presiune" care depind de pătratul vitezei:

$$\Delta_p = K_0 \cdot W^2 \qquad (271)$$

Aparatele cu care se măsoară debitele de fluid se numesc debitmetre. Debitmetrele se clasifică după principiul care stă la baza măsurării în debitmetre de viteză, voltmetrice, cu dispozitive de ştrangulare, rotametre, electromagnetice.

Debitmetrele de viteză (contoarele vitezometrice de debit) înregistrează cantitatea de fluid trecută prin conducte, într-o anumită perioadă de timp. Ele se montează pe conducte pentru determinarea volumului de fluid ce trece prin acesta. Contorul din figura 256 măsoară debitul pe baza vitezei fluidului ce pune în mişcare de rotaţie elicea *1* a cărei viteză de rotaţie este proporţională cu debitul. Prin angrenajul de roţi conice *2*, mişcarea de rotaţie a paletelor se transmite dispozitivului integrator mecanic format din şurubul-melc *3* şi roţile dinţate 4,5 şi 6 ce formează în ansamblu un angrenaj demultiplicator de turaţii. Raportul de multiplicare de la şurubul-melc *3* la roata *4*

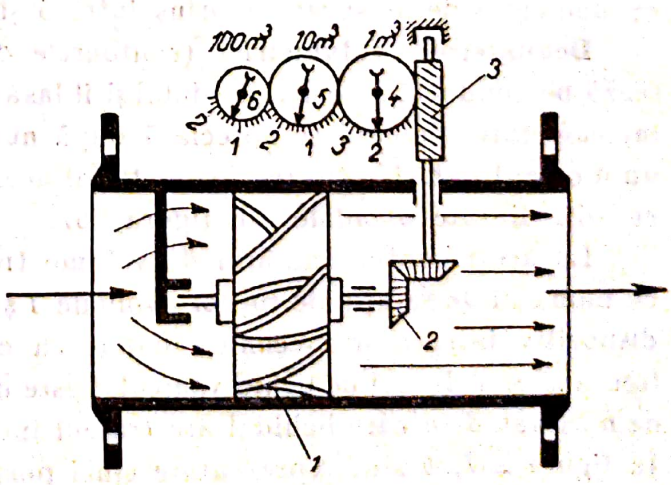


Fig. 256. Contor vitezometric de debit.

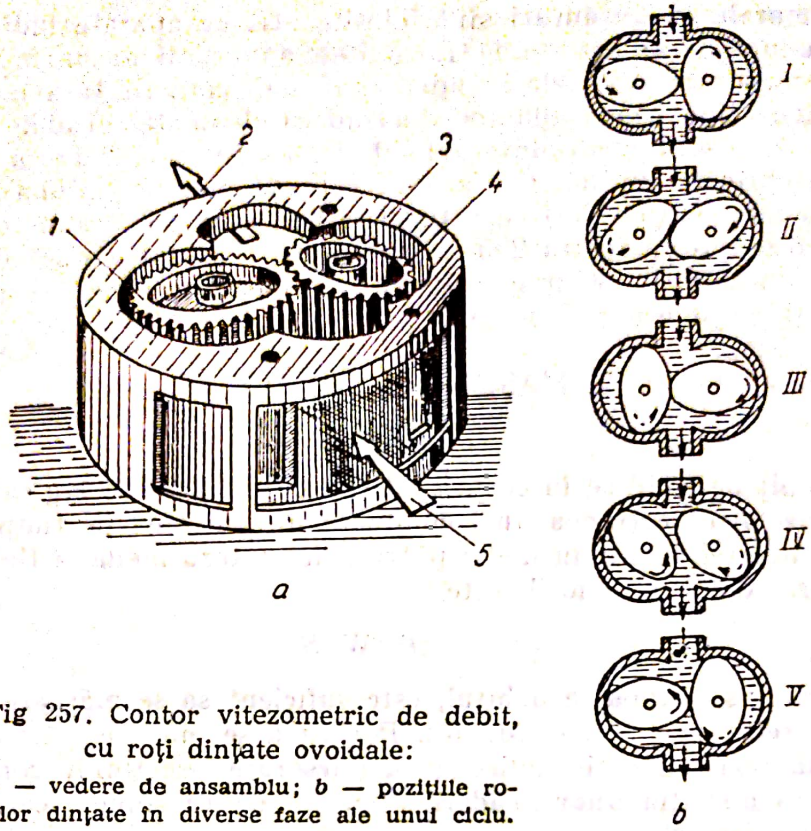


Fig 257. Contor vitezometric de debit, cu roți dințate ovoidale:
a — vedere de ansamblu; *b* — pozițiile roților dințate în diverse faze ale unui ciclu.

este astfel ales încît roata *4* să facă o rotație completă cînd prin conductă trece 1m³ de lichid. Între roțile *4* și *5* raportul de demultiplicare este 1/10 (roata *5* se rotește de 10 ori mai încet decît *4*), iar între roțile *5* și *6*, raportul este tot 1/10. Așadar, roata *5* face o rotație completă cînd au trecut 10 m³ de lichid prin conductă, iar roata *6* cînd au trecut 100 m³.

Astfel, acele indicatoare cuplate pe roțile dințate 4,5 și 6 indică respectiv unitățile, zecile și sutele de metri cubi de fluid trecut prin conductă, de la punerea în funcțiune a contorului pînă la un moment dat. În țara noastră se fabrică contoare de apă numite și apometre la Fabrica Precizia din București, cu domeniul de măsurare cuprins între 3 și 150 m³/h.

Debitmetrele volumetrice (contoarele de debit volumetrice) se intercalează pe conductă în calea fluidului și îl lasă să treacă „pe porții" (pe volume), iar cantitatea trecută se apreciază după numărul de volume trecute pînă la un moment dat. Un tip reprezentativ al acestui gen de contoare este contorul cu roți dințate ovoidale din figura 257.

La acest contor numărul de volume trecut prin conductă, proporțional cu numărul de rotații ale roților ovoidale *1* și *4* (fig. 267, *a*), este indicat de un dispozitiv integrator mecanic, similar cu cel de la contorul de viteză din figura 256. Volumul de lichid vehiculat este determinat de capacitatea camerei de măsurat *3* în care lichidul are traseul indicat de săgețile *5* și respectiv *2*. În figura 257, *b* sînt reprezentate cinci poziții succesive, I...V, ocupate de roțile dințate în cadrul unui ciclu de măsurare. În cadrul unui ciclu de măsurare,

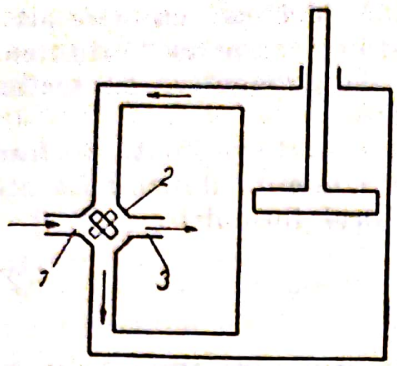


Fig. 258. Debitmetru cu piston.

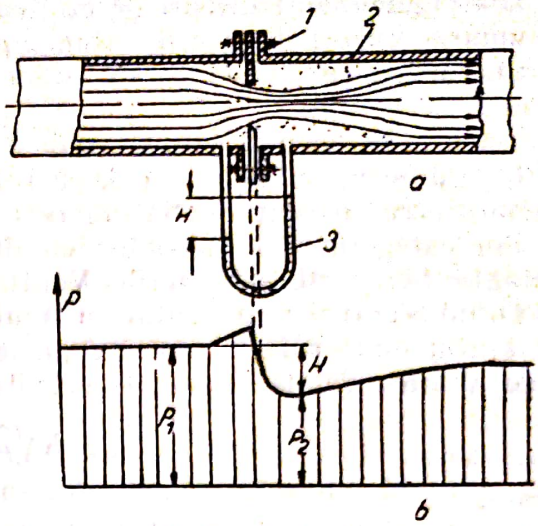


Fig. 259. Măsurarea debitului cu ajutorul diafragmei:

a — schema de principiu; *b* — diagrama de variație a presiunii în conductă.

din camera de măsurat se evacuează un volum de lichid egal cu volumul camerei Fiecare roată efectuează în această perioadă numai o jumătate de rotație. În funcție de poziția în care se află, fiecare roată devine pe rînd fie roată de antrenare, fie roată antrenată (cu săgeți pline sînt indicate sensurile mișcării roții de antrenare, iar cu săgeți punctate sensurile de mișcare ale roții antrenate). Aceste contoare sînt de o mare precizie și pot măsura debite cu valori pînă la 300 l/min. Se utilizează în principal, pentru măsurarea cantității de combustibil lichid (păcură, petrol, ulei, benzină etc.). Debitmetrul cu piston (fig. 258) se compune dintr-un cilindru care se umple cu lichid și un distribuitor *2* cu patru căi. Lichidul intră pe conducta *1* și, prin distribuitorul cu patru căi, intră sub piston, pe care tinde să-l ridice. Cînd pistonul se deplasează în sus, lichidul din partea superioară este transmis la ieșirea *3*. La atingerea poziției superioare a pistonului, un mecanism (nereprezentat în figură) schimbă poziția distribuitorului și ciclul se repetă. Debitmetrele cu piston au o precizie de $\pm 1\%$ și se folosesc și pentru fluide la temperaturi înalte.

Debitmetrele cu dispozitive de strangulare. Cea mai răspîndită metodă pentru măsurarea debitelor se bazează pe măsurarea căderii de presiune. Această metodă se utilizează într-un interval mare de temperatură și presiune a lichidelor și a gazelor. Pentru utilizarea acestei metode este necesar ca lichidele să nu conțină aburi, gaze, sau să nu se sedimenteze, iar gazele să nu conțină particulele mari în suspensie. Strangulările sînt de două feluri: cu secțiune constantă și cu secțiune variabilă. Din prima categorie, cele mai răspîndite sînt diafragmele.

Un dispozitiv de strangulare cu diafragmă (fig. 259) creează în conductă o îngustare a diametrului conductei. Din această cauză, lichidul sau gazul va avea o viteză mai mare în secțiunea îngustată. Creșterea vitezei duce la o scădere a presiunii statice în secțiunea îngustată.

Scanned with OKEN Scanner

Diafragmele sînt discuri de oţel cu un orificiu central din care cauză se mai numesc uneori şi şaibe. Presiunea p_2 de după diafragma *1* este presiunea statică, iar p_1, presiunea totală. Căderea dinamică de presiune:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \qquad (272)$$

se măsoară cu un manometru *3*, cu tub sub formă de *U* sau cu orice alt fel de manometru diferenţial. Diafragma *1* se montează pe conducta *2* prin flanşe. Tot din categoria debitmetrelor cu dispozitive de ştrangulare cu secţiune constantă fac parte şi tuburile Venturi (fig. 260).

Tubul Venturi reprezentat în figura 260 are o parte profilată de forma unui ajutaj după care urmează o parte divergentă numită difuzor. La acest tip de aparat, debitul poate fi calculat cu ajutorul formulei:

$$Q = K\sqrt{p_1 - p_2}, \qquad (273)$$

în care:

$p_1 - p_2$ este căderea de presiune la trecerea curentului de fluid prin zona de strangulare a tubului Venturi;

K — un coeficient care depinde de natura fluidului şi forma ştrangulării.

Măsurarea presiunii înainte şi după dispozitivul de ştrangulare se face, ca şi la diafragmă, prin orificii la care sînt conectate tuburi de legătură care merg la aparatul de măsurat. Ca aparate de măsurat se folosesc manometre diferenţiale cu lichid sau cu elemente elastice.

Tuburile Venturi se utilizează pentru măsurarea debitului (dispozitiv de ştrangulare) fluidelor cu viteze mari şi temperaturi înalte, acolo unde se recomandă folosirea diafragmelor. Măsurarea debitului pe baza căderii de presiune din dispozitivul de ştrangulare cu secţiune constantă oferă avantajul unei construcţii simple şi a unui preţ de cost redus al dispozitivului de măsurat, care este robust şi poate fi utilizat pentru o gamă largă de debite. Dezavantajul acestor dispozitive constă în aceea că necesită o parte rectilinie a conductei, mult mai mare decît în cazul altor metode.

Rotametrele sînt debitmetre bazate pe principiul ştrangulării unei vîne de fluid, secţiunea ştrangulării fiind în acest caz variabilă şi depinzînd de debitul lichidelor şi a gazelor pe baza deplasării unui plutitor în interiorul unui tub tronconic gradat, dispus vertical, prin care circulă fluidul de măsurat.

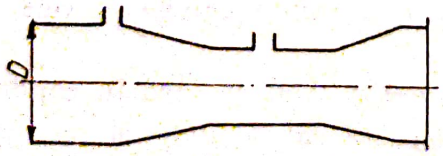


Fig. 260. Tub Venturi.

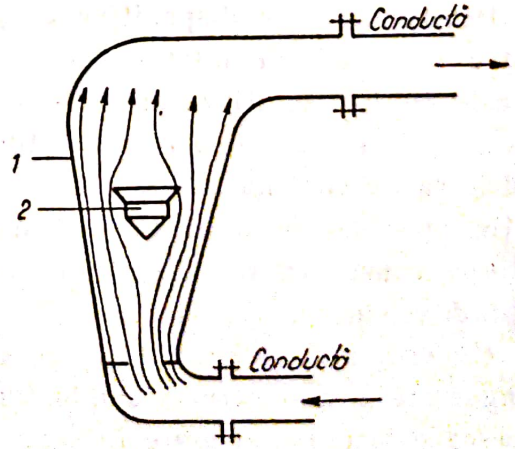


Fig. 261. Rotametru.

Rotametrele sînt folosite pe scară largă în laboratoare, dar în special în industria chimică și petrolieră, în medicină, în industria alimentară, acolo unde trebuie să se măsoare în mod continuu debitele de lichide sau gaze. În comparație cu celelalte debitmetre, rotametrele sînt caracterizate printr-o construcție simplă și ieftină, cu o pierdere mică de presiune; ele oferind posibilitatea măsurării debitului lichidelor și a gazelor agresive. De asemenea cu ajutorul rotametrelor se pot măsura debite foarte mici; ele au eroare relativ constantă și scara gradată suficient de uniformă. Ca dezavantaje se semnalează faptul că rotametrele sînt fragile și ca atare nu sînt indicate pentru măsurarea debitelor mari sau a fluidelor la presiuni și temperaturi înalte, în cazul în care rotametrul are tubul de măsurare din sticlă.

În figura 261 este reprezentat un rotametru montat pe conductă. Rotametrul tehnic este construit din tubul de sticlă *1* în interiorul căruia se găsește flotorul *2*. Acest flotor este ridicat de curentul de fluid ascendent cu atît mai sus cu cît viteza (debitul) fluidului este mai mare. Flotorul *2* are o serie de crestături la partea superioară.

Sub influența curentului de fluid flotorul va căpăta o mișcare de rotație și se va plasa în mijlocul curentului. Flotorul este în echilibru atunci cînd greutatea sa este echilibrată de forța creată de presiunea curentului de fluid. Odată cu ridicarea flotorului crește interstițiul inelar între plutitor și suprafața interioară a tubului și deci forța exercitată de curentul de fluid va scădea. Forța care tinde să se ridice flotorul este egală cu produsul dintre suprafața S a secțiunii (cerc) flotorului și diferența dintre presiunea p_1 dinaintea flotorului și presiunea p_2 după flotor, conform relației:

$$F_1 = S(p_1 - p_2) \qquad (274)$$

Forța F_2 dirijată de sus în jos este egală cu diferența dintre greutatea flotorului și greutatea fluidului dislocuit, adică:

$$F_2 = V\gamma_1 - V\gamma_2 = V(\gamma_1 - \gamma_2) \qquad (275)$$

în care:

γ_1 este greutatea specifică a materialului flotorului;
γ_2 — greutatea specifică a fluidului care trece prin tub;
V — volumul flotorului.

La echilibru forțele $F_1 = F_2$ și flotorul va fi la anumită înălțime în tubul tronconic, deplasarea acestuia depinzînd de debit.

Prin urmare, poziția flotorului poate fi gradată pe tubul tronconic în unități de debit.

Rotametrele se aleg în funcție de caracteristicile tehnice ale fluidelor al căror debit trebuie măsurat, ca: greutate specifică, viscozitate, compoziție chimică a fluidului etc.

Traductoare de debit. În țara noastră se fabrică două tipuri de traductoare de debit: traductorul electromagnetic de debit și traductorul rotametric.

Traductorul electromagnetic de debit FL281-S, ELT-530. Principiul de funcționare al traductorului este următorul: dacă se consideră o conductă cu diametrul D parcursă de un fluid cu viteza W (fig. 262), situată în cîmpul unui magnet permanent, astfel încît liniile de inducție magnetică B să fie perpendiculare pe direcția de curgere, între doi electrozi fixați pe pereții conductei diametral opuși și perpendiculari pe direcția de curgere și pe liniile

de inducție magnetică B, se induce o tensiune electromotoare e conform legii inducției, redată prin relația:

$$e = BDW, \tag{276}$$

în care:

B este inducția magnetică;
D — diametrul interior al conductei;
W — viteza fluidului în conductă.

Dacă se ține seama de expresia debitului din relația (275), pentru cazul considerat $S = \frac{\pi D^2}{4}$ astfel încît, $Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot W$, se determină tensiunea electromotoare:

$$e = BDW = BD\frac{4Q}{\pi D^2} = KQ, \tag{277}$$

unde:

$$K = \frac{4B}{\pi D} = ct$$

Din relația 279 se vede că măsurînd tensiunea indusă se obține o măsurare proporțională a debitului care trece prin conductă.

În cazul utilizării unui cîmp magnetic permanent se ajunge la o polarizare puternică a electrozilor și la apariția fenomenului nedorit de electroliză. Din această cauză se preferă utilizarea unui cîmp magnetic alternativ prin care, pe de o parte, se evită polaritatea electrozilor, iar pe de altă parte, se obține la ieșire o tensiune alternativă care oferă simplificări în construcția amplificatorului de măsurare.

Măsurarea pe cale electromagnetică a debitului are avantaje deosebite față de celelalte metode, cum sînt:

— traductorul este caracterizat de o foarte bună liniaritate;

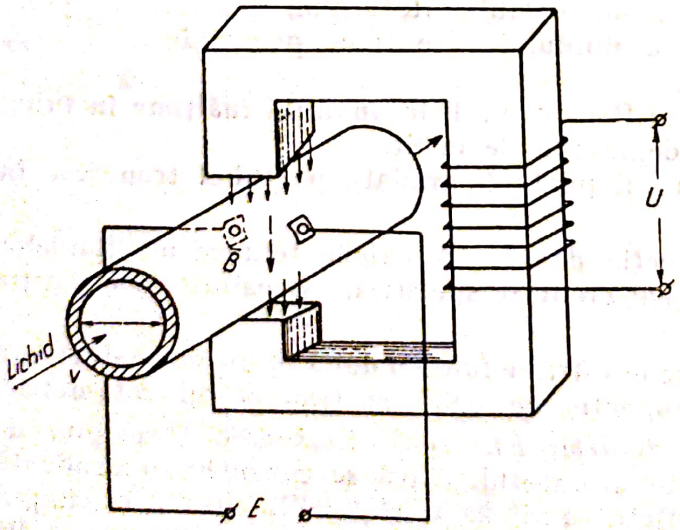


Fig. 262. Principiul de funcționare a traductorului electromagnetic de debit.

— măsurarea poate fi făcută indiferent de sensul de curgere;

— traductorul poate fi montat în orice poziție, fără a se anexa dispozitive suplimentare de uniformizare a mișcării fluidului;

— nu sînt necesare dispozitive de strangulare evitîndu-se astfel pierderile de presiune în traductor;

— este posibilă măsurarea fluidelor oricît de vîscoase sau cu suspensii;

— folosind căptușeli și electrozi corespunzători pot fi măsurate debitele unor substanțe corosive sau erozive;

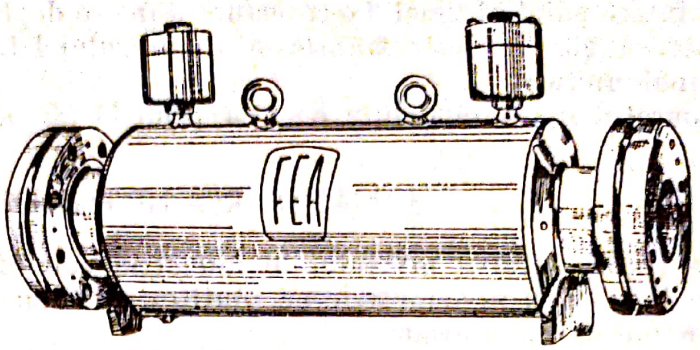


Fig. 263. Detectorul electromagnetic de debit FL-281 S.

— densitatea, viscozitatea, presiunea şi temperatura fluidului nu influenţează măsurarea.

Dintre dezavantaje, cel mai important este acela că fluidul al cărui debit se măsoară trebuie să fie bun conducător de electricitate. Traductorul electromagnetic de debit FL-281S, ELT-530 este destinat măsurării debitelor în instalaţiile industriale de măsurare, comandă şi reglare.

Traductorul are două părţi distincte:
— detectorul electromagnetic de debit FL-281S;
— adaptorul ELT-530.

Tensiunea alternativă de la elementul detector se aplică la intrarea adaptorului. Semnalul se aplică şi se redresează, după care se aplică unui multiplicator la ieşirea căruia se obţine o tensiune continuă proporţională cu tensiunea alternativă culeasă de la detector.

Tensiunea continuă obţinută la ieşirea multiplicatorului se amplifică într-un amplificator de curent continuu la ieşirea căruia se obţine semnalul unificat (2 . . . 10 mA). Semnalul unificat obţinut este proporţional cu debitul care trece prin celula de măsurare a detectorului.

Caracteristicile tehnice principale ale aparatului sînt:
— domeniul de măsurare pînă la 2 000 m^3/h.
— eroarea de măsurare $\pm 1\%$.
— mărimea de ieşire, în curent continuu 2 . . . 10 mA.

Traductorul rotametric de debit DR-100, ELT-310. Traductorul rotametric de debit DR-100 se bazează pe acelaşi principiu de funcţionare ca şi rotametrul tehnic. În acest caz însă deplasarea imersorului este transmisă unui adaptor ELT-310 spre a fi transformată în semnal unificat. Schema de principiu a traductorului rotametric de debit este reprezentată în figura 264.

Flotorul *1* este cuplat prin intermediul tijei *2* la un magnet permanent *3*. Piesa executată din fier moale *5* urmăreşte poziţia magnetului permanent. În acest mod, piesa *5* urmăreşte de fapt deplasarea flotorului

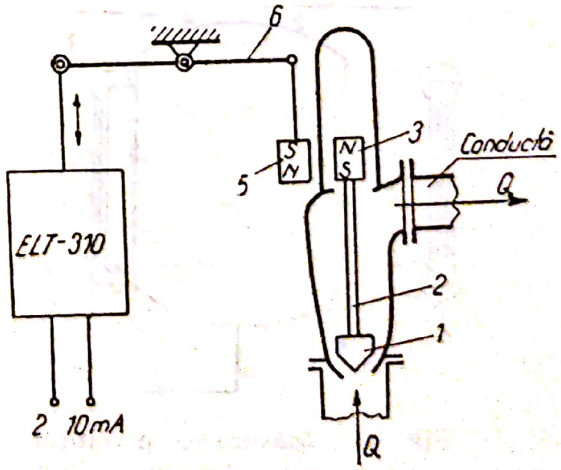


Fig. 264. Schema de principiu a traductorului rotametric.

și prin intermediul pîrghiei *6* o transformă într-o deplasare unghiulară. Această deplasare unghiulară este transmisă adaptorului ELT-310 care o transformă în semnal unificat.

Aparatul măsoară debite de apă pînă la 55 m^3/h.

3. MĂSURAREA NIVELULUI

Pentru măsurarea nivelului în industria chimică se folosesc, în special, sticlele de nivel și nivelmetrele cu plutitor, precum și sistemele de măsurare cu manometre diferențiale.

Nivelmetrele tehnice cele mai răspîndite sînt sticlele de nivel.

Sticla de nivel (fig. 265, *a*) este formată dintr-un tub *1* protejat cu armăturile metalice *2*, ce se montează prin flanșele *3* pe recipientele în care se controlează nivelul (fig. 265, *b*). Prin sticlă se observă direct nivelul lichidului din tub, același cu nivelul din vasul tehnologic. Sticlele de nivel K-10 sînt produse de IAMC-Otopeni.

Nivelmetrul cu plutitor (fig. 266) se utilizează mai mult în cazul vaselor și a rezervoarelor deschise (neetanșe).

Semnalizatorul magnetic de nivel (fig. 267) produs de IAMC Otopeni folosește tot un plutitor *1* a cărui deplasare este transmisă prin tija *2* unui magnet permanent *3*. Aparatul poate fi utilizat pentru măsurarea nivelului în vase etanșe, deoarece deplasarea magnetului *3* este transmisă în exterior pîrghiei *5*, prin intermediul altui magnet exterior *4* (vasul rămînînd etanș). Prin deplasarea pîrghiei *5* se închide contactul *7* cînd nivelul este maxim și contactul *6* cînd nivelul scade sub o valoare minimă admisibilă.

Măsurarea nivelului cu manometrul diferențial MD. Funcționarea acestui sistem de măsurare se bazează pe proporționalitatea dintre presiunea hidrostatică p a coloanei de lichid și nivelul de lichid H, corespunzător relației:

$$p=\gamma H, \tag{278}$$

în care γ este greutatea specifică a lichidului din vas. Dacă vasul tehnologic în care se măsoară nivelul este sub presiune, se folosesc două prize: una la

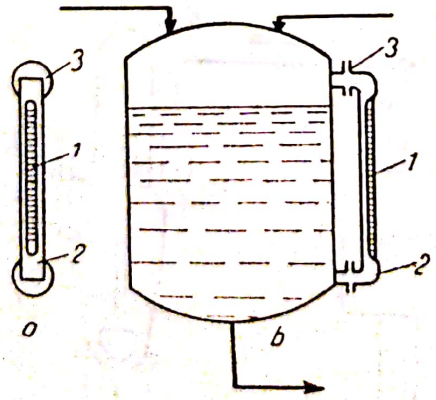


Fig. 265. Măsurarea nivelului cu sticla de nivel:
a — sticlă de nivel; *b* — sticlă de nivel montată pe vas.

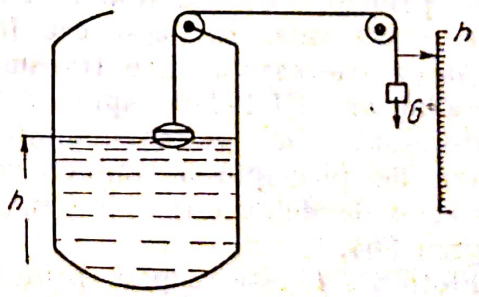


Fig. 266. Nivelmetru cu plutitor.

partea inferioară a vasului A și alta la partea superioară B, la care se conectează manometrul diferențial (fig. 268). Astfel la intrarea (+) a manometrului MD este aplicată presiunea cumulată $p_+ = p_0 + \gamma H$ iar la intrarea (—) este aplicată presiunea $p_- = p_0$, de deasupra lichidului. Aparatul indică deci presiunea diferențială:

$$\Delta p = p_+ - p_- = p_0 + \gamma H - p_0 = \gamma H \qquad (279)$$

Rezultă că indicațiile aparatului sînt proporționale cu nivelul H. Vasul V intercalat pe conducta de — (minus) este un vas de egalizare sau de referință. Acesta se umple cu lichid, astfel încît atunci cînd nivelul în vas atinge cota minimă $H = H_{min}$, aparatul indică zero. Prin aceasta se fixează limia inferioară a domeniului de măsurare a nivelului. Dacă în vas sînt vapori, aceștia se pot condensa modificînd nivelul în vasul V. De aceea, se deschide din cînd în cînd robinetul de „prea plin" pentru scurgerea surplusului de condensat.

Traductoare de nivel. Se cunosc mai multe tipuri de traductoare de nivel dintre care cele mai utilizate în instalațiile tehnologice sînt traductoarele capacitive și cele cu imersor. Metoda capacitivă de măsurare a nivelului are la bază realizarea prin electrozi suplimentari a unor capacități a căror valoare să fie dependentă de nivelul lichidului ce trebuie măsurat. În funcție de natura lichidului din rezervor (bun sau rău conducător de electricitate), elementele sensibile sînt construite în două variante ale căror scheme de principiu sînt prezentate în figura 269. În figura 269, *a* este prezentat elementul sensibil al traductorului capacitativ în cazul în care lichidul din rezervor este rău conducător, iar în figura 269, *b* cazul în care lichidul este bun conducător de electricitate.

Pentru lichidele rău conducătoare, elementul se compune dintr-un electrod neizolat *1* scufundat în lichidul al cărui nivel trebuie măsurat, izolat electric prin garnitura *3* de peretele rezervorului *4* (fig. 269, *a*). Avînd în vedere simetria radială și distribuția liniilor de cîmp electric între bornele A și B apar următoarele capacități:

C_1 — capacitatea avînd ca plăci electrodul și peretele rezervorului *4* și dielectric lichidul din rezervor;

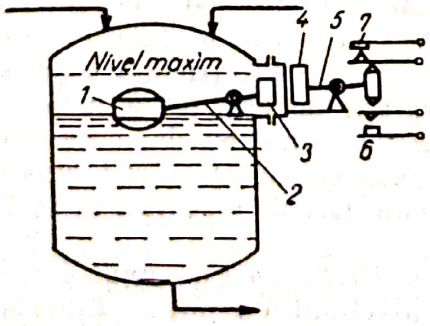


Fig. 267. Semnalizator de nivel tip SNE-1.

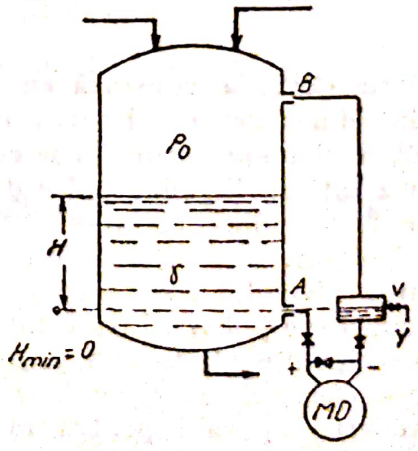


Fig. 268. Nivelmetru cu manometru diferențial.

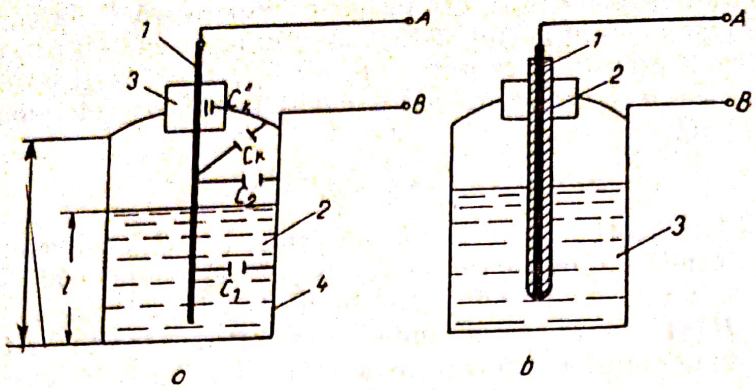


Fig. 269. Traductoare capacitive de nivel:
a — pentru lichide rău conducătoare de electricitate; *b* — pentru lichide bune conducătoare de electricitate.

C_2 — capacitatea avînd ca plăci electrodul *1* și rezervorul *4* și dielectric aerul;

C_k — capacitate ce însumează capacitatea C_k' dintre electrod și capac avînd dielectric aerul și C_k'' între electrod și capac avînd dielectric garnitura. Capacitatea între punctele *A* și *B* (cele trei capacități sînt în paralel) este C_{AB}:

$$C_{AB}=C_k+C_1+C_2 \tag{280}$$

Dar, capacitățile C_1 și C_2, ținînd seama de dimensiunile rezervorului, sînt date de relațiile:

$$C_1=\varepsilon_r C_B\frac{l}{L};\qquad C_2=C_B\frac{L-l}{L} \tag{281}$$

în care C_B este capacitatea rezervorului gol, ε_r constanta dielectrică a lichidului, iar L și l sînt dimensiunile indicate în figura 269, *a*. Rezultă capacitatea totală C_{AB}:

$$C_{AB}=C_k+C_B+l\left(\frac{\varepsilon r C_B}{L}-\frac{C_B}{L}\right) \tag{282}$$

Din relația (282) se constată cu ușurință dependența capacității de nivelul lichidului din rezervor. Pentru lichide bune conducătoare de electricitate (fig. 269, *b*) elementul sensibil se compune dintr-un electrod *1* izolat cu stratul izolator *2* față de lichidul *3*. De data aceasta rolul dielectricului îl are stratul izolator *2*, variabilă cu nivelul fiind suprafața de contact a lichidului cu stratul izolator. Pentru ambele cazuri, utilizînd asemenea elemente sensibile, măsurarea nivelului constă în măsurarea unor capacități. Traductoarele de nivel capacitive pot fi utilizate într-un domeniu larg de măsurări în atmosferă sau în recipiente aflate sub presiune.

Traductorul de nivel cu imersor AT-50, ELT-370 este unul dintre cele mai moderne aparate pentru măsurarea nivelului cu largă răspîndire în industria chimică. Industria noastră produce un asemenea aparat cu performanțe înalte (la IEA, cu indicativul AT-50, ELT-370). Principiul de funcționare al acestor aparate este descris cu ajutorul schemei din figura 270.

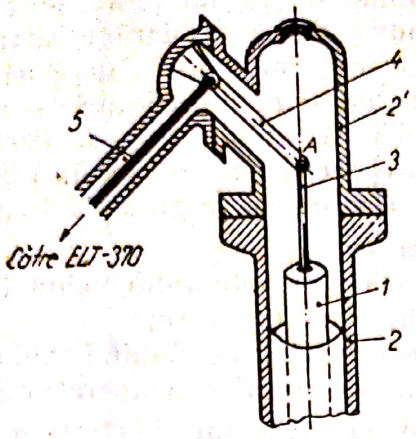


Fig. 270. Traductor de nivel cu imersor AT-50, ELT-370.

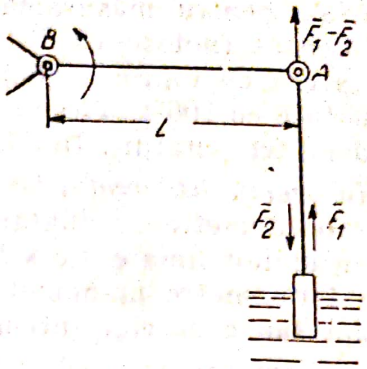


Fig. 271. Forţele care se exercită asupra imersorului.

Imersorul *1* este montat în ansamblul etanş *2,2'* şi prin pîrghiile *3* şi *4* este cuplat la bara de torsiune *5*. Fiind scufundat în lichidul al cărui nivel trebuie măsurat (fig. 271), se află sub acţiunea forţei ascensionale F_1 (forţă arhimedică) şi a forţei F_2 generate de greutatea proprie. După cum reiese din figură, cuplul activ generat în punctul B este:

$$M=l(F_1-F_2) \qquad (283)$$

În punctul B apare şi un cuplu rezistent proporţional cu unghiul de torsionare al barei *5* (fig. 270). Deoarece forţa ascensională F_1 este proporţională cu nivelul lichidului în care se află scufundat imersorul rezultă că şi unghiul de torsionare, respectiv curentul de ieşire I este proporţional cu nivelul lichidului. Cu traductorul cu imersor AT-50, ELT-370 se poate măsura nivelul oricărui lichid, nivelul de separaţie a două lichide nemiscibile cu densităţi diferite, densităţile lichidelor. Traductorul se evidenţiază printr-o funcţionare bună în condiţii climatice grele. Caracteristicile tehnice ale aparatului:

— domeniile de măsurare normale: 0 . . . 400; 0 . . . 600; 0 . . . 800; 0 . . . 1 200; 0 . . . 1 500; 0 . . . 2 000;
— mărimea de ieşire în curent continuu: 2 . . . 10 mA;
— clasa de precizie: 0,5.

F. MĂSURAREA MĂRIMILOR TERMICE ŞI TERMOCHIMICE

1. MĂSURAREA TEMPERATURII

Măsurarea precisă a temperaturii are o deosebită importanţă în industrie, deoarece de acest parametru depinde buna desfăşurare a proceselor tehnologice. Temperatura este o mărime fizică ce caracterizează starea de încălzire a corpurilor.

Pentru a se putea determina practic temperaturile, trebuie să se stabilească o scară de temperaturi. Scările de temperaturi se stabilesc prin definirea

Scanned with OKEN Scanner

unor temperaturi de bază, uşor reproductibile, de regulă punctele de solidificare sau de fierbere ale substanţelor pure. Scara gradată a aparatelor industriale pentru măsurarea temperaturilor este etalonată, în general, în grade Celsius (notate cu °C). Scara Celsius de temperaturi are ca repere: temperatura de topire a gheţii, notată cu 0°C şi temperatura de fierbere a apei, notată cu 100°C. Gradul Celsius, °C, este deci a suta parte din diferenţa celor două temperaturi. În SI, temperatura se măsoară în grade Kelvin (°K).

Măsurarea temperaturilor se poate face cu:

— termometre de dilataţie, bazate pe variaţia volumului lichidului sau a dimensiunilor liniare ale solidelor la variaţia temperaturii;

— termometre manometrice, bazate pe variaţia presiunii lichidului, a vaporilor sau a gazelor într-un sistem închis la variaţia temperaturii;

— pirometre termoelectrice bazate pe apariţia forţei electromotoare la încălzirea lipiturii diferitelor conductoare;

— termometre electrice cu rezistenţă (termorezistenţe);

— pirometre de radiaţie.

a. Termometre de sticlă cu lichid

Măsurarea temperaturii cu termometre de sticlă cu lichid se bazează pe diferenţa dintre coeficienţii de dilataţie volumetrică a lichidului şi a materialului de construcţie. Astfel indicaţiile termometrului cu lichid depind nu numai de variaţia volumului lichidului, ci şi de variaţia volumului rezervorului în care se află lichidul. Pentru confecţionarea termometrelor se folosesc sticle de calităţi speciale (termometrice). În funcţie de limitele de temperaturi măsurate, ca lichid se foloseşte pentan (de la —190 pînă la +20°C), eter de petrol (de la —130 la +25°C), alcool etilic (de la —100 la +75°C), mercur (de la —30 pînă la +700°C) etc.

Cele mai utilizate termometre cu lichid sînt cele cu mercur. Din punct de vedere constructiv (v. fig. 213), termometrul de sticlă cu lichid se compune dintr-un tub capilar *2*, cu secţiunea transversală uniformă, închis la partea superioară, iar la capătul inferior terminat cu un rezervor *1*, în care se află lichidul termometric. De cele mai multe ori tubul capilar este prevăzut la capătul opus rezervorului, cu un mic rezervor de siguranţă *3*, care protejează termometrul împotriva spargerii, în cazul în care lichidul, dilatîndu-se sub acţiunea temperaturii, depăşeşte limita superioară de măsurare. Termometrele de sticlă se produc, de obicei sub formă de baghetă şi cu scară internă.

Termometrul baghetă (fig. 272) are un capilar cu pereţi groşi cu diametrul exterior de 6—8 mm, al cărui capăt inferior formează rezervorul pentru lichid.

Capătul superior este lipit (sudat). Scara acestor termometre se aplică direct pe suprafaţa externă a capilarului. Aceste tipuri de termometre se utilizează ca termometre de laborator.

Termometrele cu scară internă (fig. 273) au capilarul cu pereţii subţiri şi rezervorul pentru mercur lărgit. Scara nu se aplică pe capilar, ci pe o plăcuţă de sticlă mată. Capilarul şi plăcuţa sînt introduse într-un tub de sticlă de protecţie fixat de rezervorul termometrului.

Scanned with OKEN Scanner

Fig. 272. Termometru baghetă.

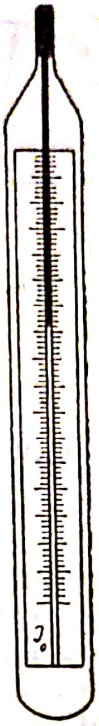


Fig. 273. Termometru cu scară internă.

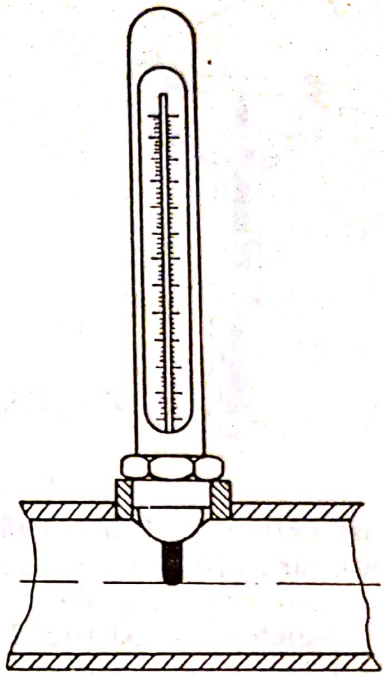


Fig. 274. Montarea termometrului în armătură metalică.

Acest tip de termometre se folosesc ca termometre tehnice (industriale). Termometrele tehnice cu mercur sînt montate de obicei într-o armătură metalică de protecţie, prevăzută în partea frontală cu o fereastră prin care se observă indicaţiile. Instalarea termometrului în armătura metalică este reprezentată în figura 274. Termometrele tehnice care se produc în ţară la Fabrica „Eprubeta" din Bucureşti au ca lichid de lucru mercurul şi se pot utiliza pentru măsurarea temperaturilor pînă la 250°C.

b. Termometre cu bimetal

Funcţionarea acestor aparate se bazează pe variaţia dimensiunilor liniare ale corpurilor solide în funcţie de variaţia temperaturii. Într-un interval mic de temperatură lungimea unor tuburi, tije sau lamele metalice depinde aproximativ liniar de temperatură. Legătura între alungirea Δl a unui material, coeficientul de dilatare liniară α_t şi creşterea temperaturii $\Delta\theta$ este definită prin relaţia:

$$\Delta l = \alpha_t \cdot \Delta\theta \qquad (284)$$

Aceste aparate convertesc temperatura într-o deplasare care poate fi transmisă la un indicator. Termometrele bazate pe acest principiu sînt de două

Scanned with OKEN Scanner

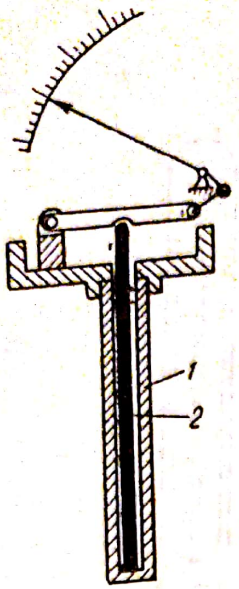


Fig. 275. Termometru cu tub și tijă.

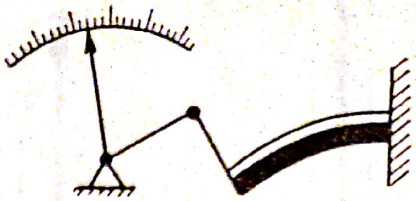


Fig. 276. Schemă de principiu a unui termometru bimetalic.

tipuri constructive: cu tub și tijă și cu lamă bimetalică. Termometrul cu tub și tijă din figura 275 se compune din tubul *1*, care este confecționat dintr-un material cu un coeficient de dilatare liniară mare: alamă, bronz, aluminiu cupru, crom-nichel etc., și tija *2* confecționată dintr-un material cu un coeficient de dilatare foarte mic: porțelan, cuarț etc.

La creșterea temperaturii, tubul se dilată mai mult decît tija, iar capătul liber al acesteia se deplasează în jos. Această deplasare depinde de temperatură și este transmisă acului indicator prin intermediul unui mecanism cu pîrghii. Mecanismul de transmitere a deplasării are rolul de a amplifica deplasarea și de a se transmite acului indicator.

Termometrul cu bimetal din figura 276 este format dintr-o lamă bimetalică (formată din două lame sudate pe toată lungimea lor) și un mecanism de transmitere a deplasării la acul indicator. Ca și la termometrele cu tub și tijă, cele două materiale din care se confecționează lamele trebuie să aibă coeficienți de dilatare liniară foarte diferiți. Sudarea celor două lame este executată pe toată suprafața lor. Cînd temperatura crește, lama care are un coeficient de dilatare mare se dilată mai mult și lama bimetalică se îndoaie în partea lamei cu un coeficient de dilatare redus. Deplasarea capătului liber al lamei bimetalice poate fi transmisă la acul indicator, direct sau prin intermediul unui mecanism special de transmitere. La termometrele bimetalice în funcție de sensibilitatea dorită lama poate fi și de formă spirală sau elicoidală. Grosimea lamei bimetalice este cuprinsă în general între 0,05 și 2 mm, iar lungimea ei se alege în funcție de deplasarea care trebuie să fie transmisă acului indicator. Limita de temperaturi măsurate cu acest gen de termometre este cuprinsă între (−50°C și +50°C).

c. Termometre manometrice

Termometrul manometric (fig. 277) se compune dintr-o sondă (balon) *1* umplută cu lichid sau cu gaz și unită printr-un tub capilar *2* cu un tub elastic *3*. Tubul elastic este curbat și are o secțiune ovală sau elipsoidală. Capătul

liber al tubului este legat prin intermediul unor articulaţii sau angrenaje de acul indicator. La încălzirea balonului umplut, de exemplu cu azot, presiunea din sistemul închis creşte şi capătul liber al tubului elastic se va deplasa. Această deplasare este transmisă acului indicator; prin urmare aparatul poate fi gradat în °C.

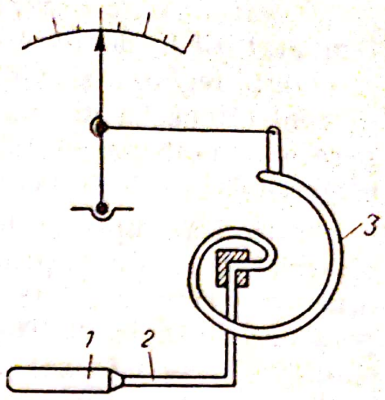


Fig. 277. Termometru manometric.

Principalele avantaje ale termometrelor manometrice sînt:

— sensibilitate ridicată;
— construcţie simplă;
— siguranţă împotriva exploziilor;
— rezistenţă la trepidaţii.

Dezavantaje:

— variaţiile temperaturii mediului exterior influenţează asupra tubului capilar;
— necesitatea unor verificări a funcţionării corecte;
— reparaţii dificile în cazul ruperii tubului capilar.

Precizia termometrelor manometrice este mică, ajungînd pînă la clasa de precizie 2,5. Termometrele manometrice cu substanţe lichide organice (xilen, alcool, hexan) se utilizează pentru intervalul de temperatură de la −80°C pînă la 320°C, iar cele cu vapori saturaţi ai unui lichid cu punct de fierbere scăzut (butan, clorură de metil, eter etilic etc.), pentru intervalul de temperatură de la 0°C pînă la 250°C. Termometrele manometrice umplute cu gaze (argon, azot etc.) se folosesc în limite mai largi de temperatură de la −200°C pînă la +600°C. Deoarece tubul elastic înmagazinează suficientă energie la variaţia presiunii datorită modificării temperaturii, deplasarea acestuia poate fi utilizată şi pentru deplasarea unei peniţe (cu cerneală specială) pe o diagramă.

d. Termometre cu rezistenţă (termorezistenţe)

Termometrele cu rezistenţă au la bază fenomenul de variaţie a rezistenţei electrice a unui fir metalic în funcţie de temperatura lui. Cunoscîndu-se legea de variaţie a rezistenţei electrice cu temperatura, se poate determina temperatura prin măsurarea rezistenţei electrice a firului cu un aparat de măsurat sau cu o instalaţie corespunzătoare.

Ansamblul de măsurare a temperaturii, bazat pe acest principiu, se compune din următoarele elemente:

— termorezistenţa, care formează elementul sensibil, adică firul metalic care-şi modifică valoarea rezistenţei electrice odată cu schimbarea temperaturii mediului în care se află, teaca de protecţie, cutia de conexiuni şi firele de ieşire care fac legătura între elementul sensibil şi borne;
— dispozitivul electric de măsurare care poate fi, după necesităţi, de mai multe tipuri (logometru, punte);
— conductoarele de legătură dintre termorezistenţa şi dispozitivul de măsurare.

Scanned with OKEN Scanner

Termometrele cu rezistenţă care permit indicarea sau înregistrarea valorii temperaturii la distanţă faţă de punctul de măsurare, sînt de precizie mare şi permit reglarea şi controlul centralizat al temperaturii. Termorezistenţele se confecţionează din materiale a căror rezistenţă electrică variază cu temperatura, materialele folosite frecvent fiind: — platina, cuprul, nichelul, materialele semiconductoare etc.

Datorită proprietăţilor sale, platina s-a dovedit a fi cel mai corespunzător material. Una dintre proprietăţile mai importante ale platinei care au determinat folosirea acesteia la confecţionarea termorezistenţelor sînt: are temperatura de topire foarte mare (1 769°C), se oxidează greu (practic se poate spune că nu se oxidează prin comparaţie cu celelalte metale utilizate în acelaşi scop), reproduce foarte bine valoarea rezistenţei electrice pentru orice temperatură cuprinsă în intervalul de utilizare; îi corespunde o relaţie simplă între valoarea rezistenţei şi temperatură. Termorezistenţele sînt utilizate pe scară largă în industrie la măsurarea temperaturilor cuprinse între —120°C şi +500°C. Avîndu-se în vedere că termorezistenţele trebuie să fie ieftine, în măsurările de precizie mai mică se folosesc metale obişnuite pentru confecţionarea termorezistenţelor. Astfel, cuprul avînd o variaţie liniară a rezistenţei electrice în funcţie de temperatură, rezistenţa se poate exprima prin relaţia:

$$R_t = R_0(1 + \alpha_t) \qquad (285)$$

unde α este coeficientul de variaţie cu temperatura al rezistenţei electrice. Dezavantajul principal al cuplului este rezistivitatea sa mică în comparaţie cu platina. Valoarea minimă a rezistenţei electrice a unei termorezistenţe este determinată de rezistenţa electrică a conductoarelor de legătură pînă la aparatul de măsurat. Din aceste motive, de obicei valoarea rezistenţei la 0°C se ia de cel puţin 40 Ω. Valoarea maximă a rezistenţei este de asemenea limitată, deoarece utilizarea unor conductoare subţiri scade rezistenţa mecanică, a elementului termosensibil. Astfel valoarea maximă a rezistenţei în general nu depăşeşte 100 Ω. Constructiv, termorezistenţele se prezintă sub formă de fire sau benzi, care se înfăşoară pe un suport special. Materialul suportului trebuie să fie termostabil şi să aibă o rezistenţă mecanică ridicată. Pentru temperaturi înalte se folosesc suporturi din cuarţ şi porţelan, iar pentru temperaturi joase se foloseşte mica. Suporturile pot fi sub formă elicoidală, sub formă de cruce sau sub forma unei plăci cu margini zimţate. Capetele suporturilor sînt în contact cu două benzi metalice care fac legătura cu bornele termorezistenţelor. În figura 278 sînt reprezentate două tipuri de suporturi pentru termorezistenţe.

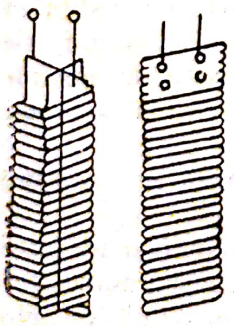


Fig. 278. Tipuri de suporturi în construcţia termorezistenţelor.

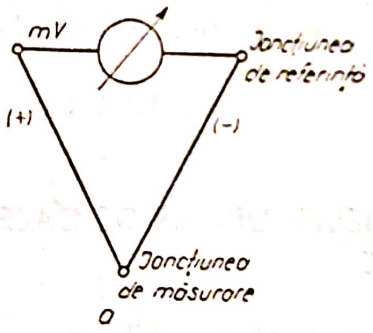
Aşa cum se vede în figura 278, rezistenţa este conectată la bornele aflate în capătul termorezistenţei, de unde pleacă conductoarele de legătură cu aparatele de măsurat. Pentru temperaturi joase, pînă la 150°C, se folosesc conductoarele de legătură din cupru. La temperaturi înalte se folosesc conductoare de legătură din materiale termorezistente, iar pentru operaţii de etalonare se folosesc

conductoare de legătură din platină. În țară se produc termorezistențe de platină la Fabrica de elemente pentru automatizare (IEA), domeniul de temperatură fiind între —200°C și +500°C.

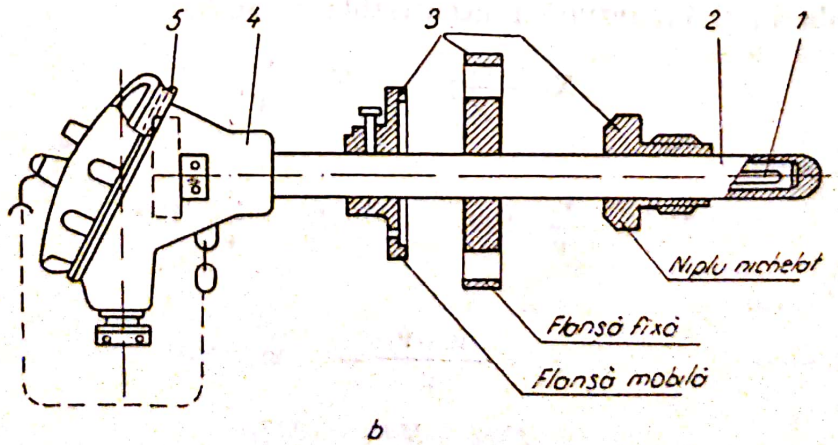
e. Termocupluri

Termocuplul este folosit pe scară largă la măsurarea temperaturilor cuprinse între —100°C și +1 300°C. Domeniul de utilizare și intervalul de temperatură în care poate fi utilizat un termocuplu depinde de construcția acestuia. Măsurarea temperaturii cu ajutorul termocuplului se bazează pe fenomenul termoelectric: dacă într-un circuit format din două conductoare din materiale diferite și sudate la cele două extremități se încălzește unul dintre cele două puncte de contact, în circuit apare o tensiune electromotoare care depinde de temperaturile celor două extremități. Tensiunea electromotoare care apare datorită încălzirii a două conductoare din materiale diferite și sudate între ele se numește tensiune termoelectromotoare. În figura 279, *a* este prezentată schema de principiu a unui termocuplu, iar în figura 279, *b* un termocuplu fabricat la IEA.

Termocuplul este format din două sîrme de metale sau aliaje metalice diferite, sudate la unul din capete împreună formînd joncțiunea de măsurare. Prin încălzirea locală a joncțiunii de măsurare, la capetele libere (la jonc-



a



b

Fig. 279. Termocuplu:
a — schema de principiu; *b* — termocuplul industrial fabricat de IEA; *1* — termoelemente izolate cu tuburi sau mărgele ceramice; *2* — teacă de protecție; *3* — dispozitiv pentru montare; *4* — cutie de borne cu capac; *5* — placă de borne.

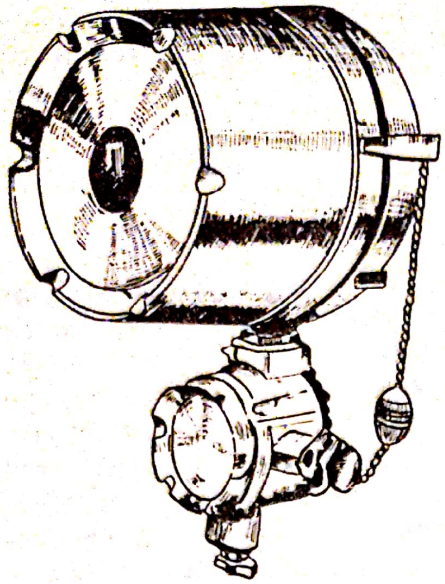


Fig. 280. Adaptor pentru detectorul de temperatură ELT-160.

ţiunea de referinţă) apare o diferenţă de potenţial proporţională cu diferenţa de temperatură dintre joncţiunea de măsurare şi cea de referinţă.

Dacă temperatura joncţiunii de referinţă este menţinută constantă, măsurarea tensiunii la capetele libere ale termocuplului permite o măsurare indirectă a temperaturii în locul în care se află joncţiunea de măsurare. Pentru menţinerea constantă a temperaturii joncţiunii de referinţă se realizează distanţarea geometrică corespunzătoare a celor două joncţiuni, urmînd ca eventualele variaţii ale temperaturii de referinţă să fie compensate de un element adaptor. Tensiunea termoelectromotoare care rezultă este de ordinul milivolţilor, ea depinzînd de temperatura la care se găseşte joncţiunea de măsurare şi de caracteristicile termocuplului. Semnalul de tensiune de ordinul milivolţilor (tensiune continuă) poate fi convertit în semnal unificat de 2 . . . 10 mA c.c.

IEA fabrică astfel de blocuri de adaptare ELT-160, ELT-161 care realizează odată cu convertirea tensiune-curent şi liniarizarea caracteristicilor statice ale termocuplului şi compensarea variaţiilor de temperatură la capetele de referinţă ale termocuplului.

În figura 280 este reprezentat în vedere adaptorul ELT-160.

2. MĂSURAREA COMPOZIŢIEI AMESTECURILOR DE GAZE ŞI LICHIDE

Analizoarele sînt aparate care se folosesc pentru stabilirea concentraţiei unor componente într-un amestec dat. Dacă într-un anumit volum V de amestec constituit din două componente C_1 şi C_2, acestea ocupă fiecare volumele parţiale V_1 şi V_2, rezultă concentraţiile X_1 şi X_2:

$$X_1 = \frac{V_1}{V}; \qquad X_2 = \frac{V_2}{V} \tag{286}$$

sau în procente:

$$X_1\% = \frac{V_1}{V} \cdot 100; \qquad X_2\% = \frac{V_2}{V} \cdot 100 \tag{287}$$

Se constată că:

$$X_1 + X_2 = \frac{V_1 + V_2}{V} = 1, \text{ respectiv} \tag{288}$$

$$X_1\% + X_2\% = 100\% \tag{289}$$

Scanned with OKEN Scanner

Stabilirea concentrației diferitelor componente în amestec se face cel mai simplu în cazul amestecurilor binare (formate din două componente). Majoritatea analizoarelor de compoziție se bazează pe influența concentrației unui anumit component din amestec, asupra anumitor proprietăți ale amestecului.

Analizoarele utilizate în industria chimică sînt de două categorii: analizoare pentru amestecuri binare și analizoare pentru amestecuri complexe (formate din mai multe componente).

Datorită diversității mari de analizoare, atît ca principiu de funcționare cît și din punct de vedere constructiv, în continuare sînt prezentate cîteva tipuri reprezentative.

Analizoare termochimice. Funcționarea analizoarelor termochimice se bazează pe aprecierea concentrației unei componente după căldura degajată în urma reacției la care participă componenta respectivă. După tipul reacției care are loc, analizoarele sînt termocatalitice și cu termosorbție.

Analizorul termocatalitic. Funcționarea analizorului are la bază căldura unei reacții de oxidare (de ardere) a componentei din amestec în prezența unui catalizator. Deoarece are loc arderea tuturor componentelor combustibile din amestecul de analizat, se determină concentrația mai multor componente (cum ar fi: CO, H_2, CH_4 etc.), care în ansamblu sînt tratate ca o singură componentă combustibilă. Analizorul folosește o celulă de măsurare și una de referință ca în figura 281.

Filamentul de platină este încălzit la o temperatură de circa 450°C pentru a facilita reacția de oxidare (filamentul de platină este și catalizator). Arderea componentelor combustibile din gazul de analizat va determina o creștere a temperaturii filamentului și deci o modificare a rezistenței electrice a acestuia, determinînd dezechilibrul punții Wheatstone în ale cărei brațe sînt conectate cele două celule (de analiză și de referință). Prin celula de analiză circulă amestecul de analizat, iar prin celula de referință, gazul fără componenta a cărei concentrație trebuie determinată. De exemplu, dacă prin celula de analiză *1* circulă aer amestecat cu componenta (sau componentele) de analizat, prin celula de referință *2* circulă aer curat. Dacă amestecul de analizat nu conține componenta de analizat puntea rămîne în echilibru. În caz contrar, puntea se dezechilibrează, iar tensiunea de dezechilibru indicată de milivoltmetru este proporțională cu concentrația componentei din amestecul de analizat.

Analizorul cu termosorbție (termoflux). Funcționarea analizorului se bazează pe creșterea temperaturii unei soluții datorită căldurii rezultate în urma reacției chimice dintre soluție și componenta analizată din amestecul

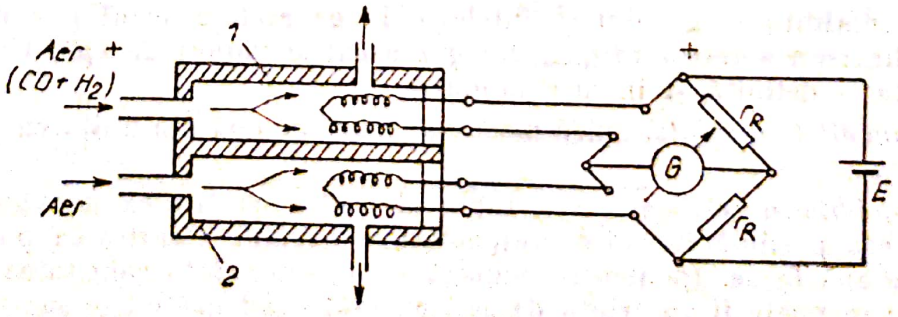


Fig. 281. Analizor termocatalitic.

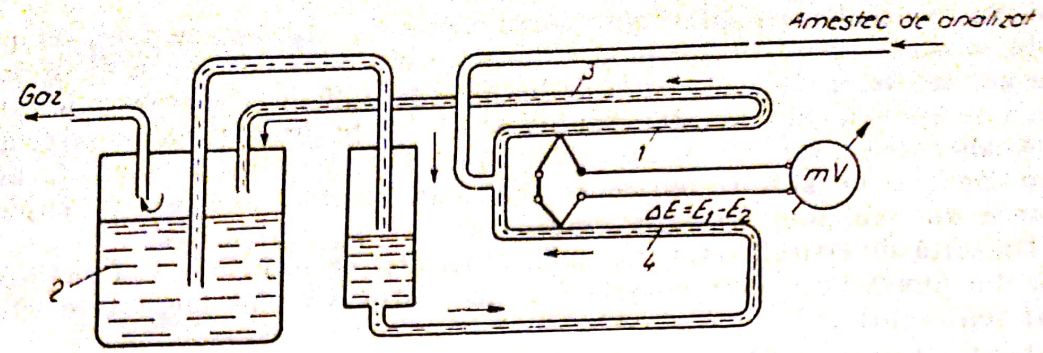


Fig. 282. Analizor cu termosorbție (termoflux).

de gaze. Se utilizează pentru determinarea concentrațiilor de SO_2, CO_2, O_2, NH_3, NO_2, Cl și alte gaze ce intră în reacții exoterme (cu degajare de căldură). Schema aparatului este reprezentată în figura 282. Amestecul de analizat este introdus în tubul superior *1* cu absorbant. În acest tub, amestecul intră în contact cu lichidul care absoarbe componenta a cărei concentrație trebuie determinată. Pentru menținerea constantă a compoziției și temperaturii, lichidul absorbant circulă continuu. Circulația se produce datorită amestecului gazos, care antrenează lichidul impurificat, readucîndu-l în vasul *2* prin conducta *3*, iar prin conducta *4* lichidul proaspăt, după desorbția (eliberarea), gazelor în vasul *2* reintră în circuit.

Temperatura în zona de absorbție *1* și în zona de lichid proaspăt *4* se măsoară cu două termocupluri ce produc tensiunile termoelectromotoare E_1 și E_2. Dacă sînt conectate în serie, ca în figură, se obține o diferență de potențial $\Delta E = E_1 - E_2$ care este proporțională cu diferența temperaturilor în tubul *1* și *4* și deci proporțională cu concentrația componentei absorbite din amestecul gazos analizat.

Această tensiune este indicată de milivoltmetrul cu scara gradată în procente (%). Deoarece aceste analizoare permit determinarea concentrației gazelor de SO_2, NH_3, Cl_2 etc., sînt folosite în instalațiile tehnologice de producere a acidului sulfuric, a amoniacului și a produselor clorosodice.

3. MĂSURAREA UMIDITĂȚII GAZELOR

Prin umiditatea gazului se înțelege, în general, concentrația de vapori de apă dintr-un amestec format din gaz uscat și vapori de apă. Umiditatea mai poate fi definită și în alte moduri.

— *umiditate absolută*, adică masa vaporilor de apă din unitatea de volum de amestec;

— *umiditatea relativă*, adică raportul dintre cantitatea de vapori existentă și cea posibilă în starea respectivă a gazului. Cantitatea posibilă de vapori de apă în aer (pentru o anumită stare) reprezintă cantitatea maximă de vapori ce poate fi absorbită de aer, excesul condensîndu-se sau rămînînd în suspensie sub formă de ceață vizibilă. Dacă se notează cu f umiditatea

absolută și cu f' umiditatea absolută la saturație, umiditatea relativă în procente este dată de relația:

$$\varphi\% = \frac{f}{f'} \cdot 100 \qquad (290)$$

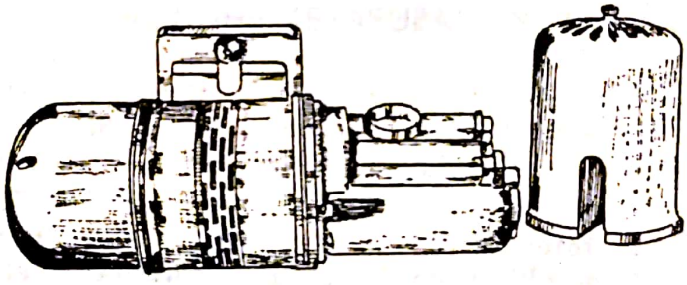
Aceeași mărime poate fi exprimată în forma:

$$\varphi\% = \frac{P_v}{P_{vs}} \cdot 100 \qquad (291)$$

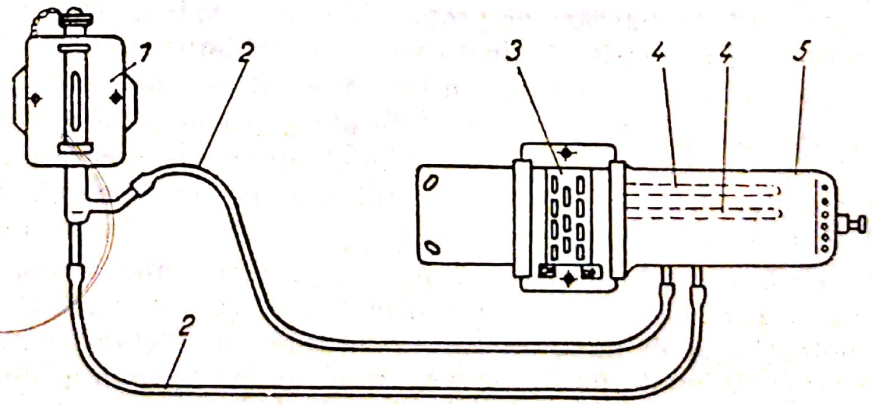
în care P_v este presiunea parțială a vaporilor de apă la temperatura de lucru, iar P_{vs} reprezintă presiunea parțială a vaporilor la saturație, la aceeași temperatură. Pentru măsurarea umidității se utilizează metode gravimetrice, higrometrice și psihrometrice.

Metoda gravimetrică se bazează pe determinarea cantității de apă absorbită din mediul de măsurat de anumite substanțe chimice speciale. O cantitate anumită din gazul analizat este trecută printr-un reactiv care, în prealabil, a fost cîntărit. Cîntărindu-se reactivul și după ce gazul a fost vehiculat prin el, diferența față de greutatea inițială reprezintă tocmai cantitatea de apă rezultată din vaporii existenți în gazul de analizat. Făcîndu-se raportul între cantitatea de vapori extrasă și volumul de gaz vehiculat, se obține umiditatea absolută.

Metoda higrometrică se bazează pe modificarea directă sau indirectă a proprietăților fizice ale unor substanțe în funcție de umiditatea existentă.



a



b

Fig. 283. Umidometru U-121:

a — vedere de ansamblu a traductorului U-121; *b* — schema de principiu a umidometrului.

Metoda psihrometrică se bazează pe sesizarea căldurii necesare procesului de evaporare a apei. Această metodă de analiză a umidității constă în vehicularea gazului de analizat pe lîngă două termometre unul uscat, iar altul cu bulbul înfășurat în tifon umezit în permanență cu apă distilată.

Datorită evaporării apei, temperatura indicată de termometrul umed este mai scăzută (căldura necesară pentru evaporare fiind preluată de la corpul termometrului). Evaporarea este mai intensă în condițiile unei umidități scăzute a gazului vehiculat. Deci, cu cît gazul vehiculat este mai umed, cu atît diferența dintre temperaturile indicate de cele două termometre este mai mică. Această diferență de temperatură, numită diferență psihrometrică, prelucrată prin relații de calcul complexe sau cel mai adesea grafic, determină umiditatea relativă.

Umidometrul U-121 (fig. 283) funcționează pe baza metodei psihrometrice și este produs în serie la IEA. Umidometrul U-121 (fig. 283, *a*) se conectează la aparatul înregistrator E-736, fabricat tot de IEA și permite controlul continuu și de la distanță al umidității. Aparatul (fig. 283, *b*) este compus dintr-un corp în care sînt montate două termorezistențe *4* (una uscată și una umedă), un bazin *5* pentru umezirea unei termorezistențe și un ventilator *3* pentru circulația forțată a gazului analizat. Aparatul poate fi prevăzut și cu un bazin suplimentar *1* (de alimentare cu apă) care comunică cu rezervorul de umezire *5* prin conductele *2*. Domeniul de măsurare este 20 . . . 100% umiditate relativă.

4. MĂSURAREA *p*H-ULUI

În industria chimică este necesară urmărirea desfășurării reacțiilor chimice. Unul dintre indicatorii de bază care permit urmărirea desfășurării în special a reacțiilor de neutralizare este *p*H-ul.

Indicele *p*H variază între 0 și 14, în intervalul 0 . . . 7, caracterizează soluțiile acide, iar în intervalul 7 . . . 14 soluțiile bazice. Pentru măsurarea *p*H-ului se utilizează, de obicei, două metode: calorimetrică și electrometrică.

Metoda calorimetrică este utilizată în analizele de laborator mai mult ca metodă calitativă. Se bazează pe proprietatea unor substanțe (fenolftaleină, turnesol, metil-oranj), numite indicatori de a-și schimba culoarea în raport cu concentrația ionilor de hidrogen, în limite de circa două unități *p*H.

Fiind o metodă calitativă care permite obținerea de date discontinue nu este utilizată prea frecvent în industria chimică, unde este necesară măsurarea continuă a *p*H-ului. Această metodă se utilizează în laboratoarele de analiză ca metodă didactică.

Metoda electrometrică se bazează pe comportarea unui metal introdus într-o soluție ce conține ioni ai aceluiași metal. Metalul scufundat în soluție capătă un potențial ce depinde de concentrația ionilor metalului în soluție și de temperatură. În mod similar se comportă și hidrogenul, proprietate ce stă la baza măsurării concentrației ionilor de hidrogen. Deoarece nu este posibilă măsurarea potențialului unui electrod în raport cu soluția, în afară de electrodul principal de măsurare se mai folosește și un electrod de referință al cărui potențial trebuie să rămînă constant. În calitate de electrozi de măsurare se folosesc electrozi de hidrogen, de chinhidronă, de antimoniu sau de

Scanned with OKEN Scanner

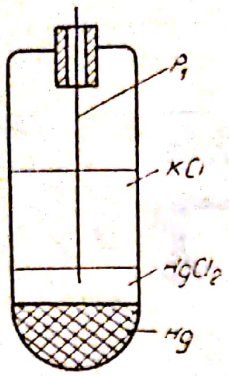


Fig. 284. Electrod de calomel (de referinţă).

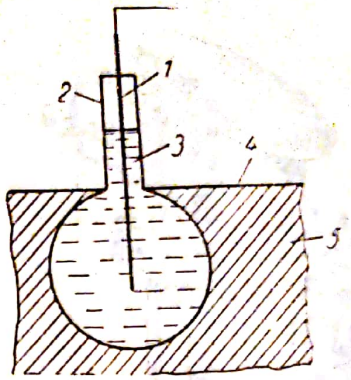


Fig. 285. Electrod de sticlă (de măsurare).

sticlă. Pentru comparare (referinţă) se utilizează electrozi de calomel sau clorură de argint. Electrodul de chinhidronă este realizat pe baza chinhidronei, combinaţie moleculară de chinonă şi hidrochinonă în cantităţi echivalente. Constructiv este realizat sub forma unei sîrme de aur sau platină ce se scufundă în soluţia de cercetat, în care în prealabil, s-a introdus chinhidronă. Electrodul de chinhidronă nu se foloseşte în prezenţa substanţelor oxidante sau reducătoare deoarece s-ar obţine rezultate eronate.

Electrodul de calomel este electrodul de referinţă cu cea mai largă utilizare. Este format dintr-un electrod de mercur în contact cu o soluţie de clorură de potasiu saturată. Potenţialul electrodului de calomel este constant, dacă nu se modifică concentraţia clorurii de potasiu. Constructiv, electrodul de calomel este reprezentat în figura 284. Cel mai folosit este electrodul de calomel cu soluţie saturată de KCl datorită lipsei contactului lichid şi a influenţei reduse a temperaturii asupra potenţialului electric al electrodului.

Electrodul de sticlă este compus din firul de platină *1*, tubul de sticlă *2*, soluţia — tampon *3*, membrana de sticlă cu constituţie specială *4* şi lichidul *5* al cărui *p*H se măsoară (fig. 285).

La scufundarea electrodului de sticlă în soluţia de analizat, între conductorul de platină şi soluţia de analizat apare o diferenţă de potenţial dependentă de *p*H şi de temperatura soluţiei. Avantajele pe care le aduce electrodul de sticlă sînt domeniul larg de măsurare pe care îl are, 0,5 . . . 13,5 *p*H şi precizia mare a indicaţiilor, chiar şi în prezenţa substanţelor reducătoare coloidale sau oxidante.

Traductorul de *p*H fabricat de IEA în cadrul sistemului unificat E este compus dintr-un detector de *p*H, W-63 (fig. 286) şi un adaptor ELT-630 (fig. 287).

Detectorul de *p*H se fabrică în mai multe variante care se deosebesc între ele după condiţiile de montare. Varianta W-63 se utilizează la măsurarea *p*H-ului soluţiilor ce curg în flux continuu prin conducte. Traductorul se intercalează pe conductă prin prindere cu flanşe. Între electrodul de măsurare *M* (electrod de sticlă) al detectorului (fig. 288) şi electrodul de referinţă *R* (electrod de calomel) este o diferenţă de potenţial *U* variabilă proporţional

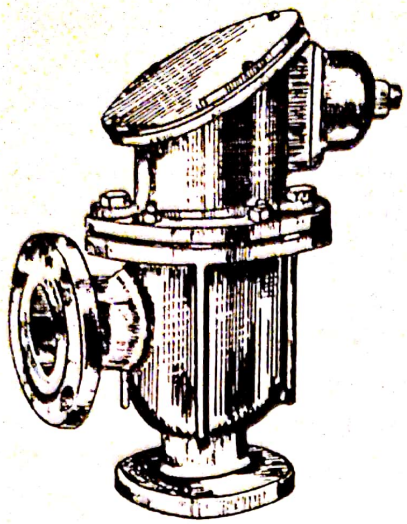


Fig. 286. Detectorul de *p*H cu electrod de sticlă W-63.

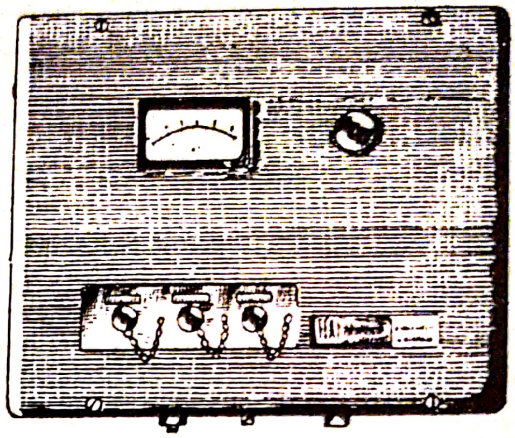


Fig. 287. Adaptorul ELT-630 pentru detectorul de *p*H, W-63.

cu *p*H-ul soluției ce curge prin detector. Cînd *p*H-ul se modifică între 0 și 14 *p*H, tensiunea între electrozi variază între +407 și −407 mv.

Din figura 289 rezultă că tensiunea U depinde nu numai de *p*H, ci și de temperatură; de exemplu cînd prin detector circulă o soluție acidă cu *p*H=2 încălzită la temperatura de 20°C, între electrozii R și M apare o diferență de potențial $U \simeq 300$ mV. Dacă aceeași soluție este încălzită la temperatura de 80°C, tensiunea U dezvoltată între electrozi este de 350 mV. Acesta este un mare inconvenient, deoarece *p*H-metrul fiind etalonat la temperatura de 22°C, indică eronat *p*H=1, cu toate că *p*H-ul soluției a rămas același, adică *p*H=2. Pentru compensarea unor asemenea erori produse de variațiile temperaturii soluției, detectorul de *p*H mai conține și o termorezistență *Tr*

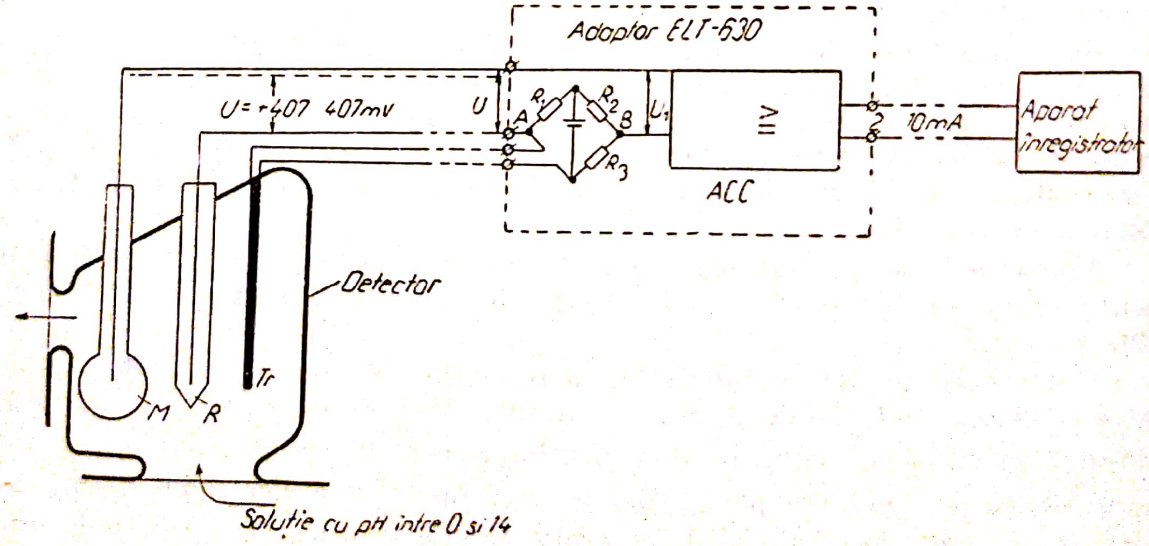


Fig. 288. Conectarea detectorului de pH, W-63, la adaptorul ELT-630.

în afară de electrodul de măsurare M și de electrodul de referință R.

Tensiunea U dintre electrozi nu este transmisă direct amplificatorului ACC din adaptor, ci, după ce i se adaugă tensiunea de dezechilibru — U_{AB} a unei punți electrice în brațul căreia este conectată termorezistența Tr. Puntea este astfel construită încît la 22°C se află în echilibru și $U_{AB}=0$. În acest caz, tensiunea $\Delta U_1 = U - U_{AB}$ transmisă amplificatorului este egală cu tensiunea dintre electrozi U. Dacă temperatura crește, termorezistența Tr își mărește rezistența și dezechilibrează puntea producînd o tensiune U_{AB} ce compensează variația tensiunii U dintre electrozi cu temperatura. În exemplul menționat s-a constatat că la o creștere a temperaturii soluției pînă la 80°C, tensiunea a crescut la valoarea $U=350$ mV, în loc de 300 mV. În cazul existenței termorezistenței rezultă și un dezechilibru al punții $\Delta U_1 = U - U_{AB} = 350 - 50 = 300$ mV adică ceea ce ar fi trebuit să fie. În acest mod sînt compensate influențele variației temperaturii soluției asupra indicației aparatului.

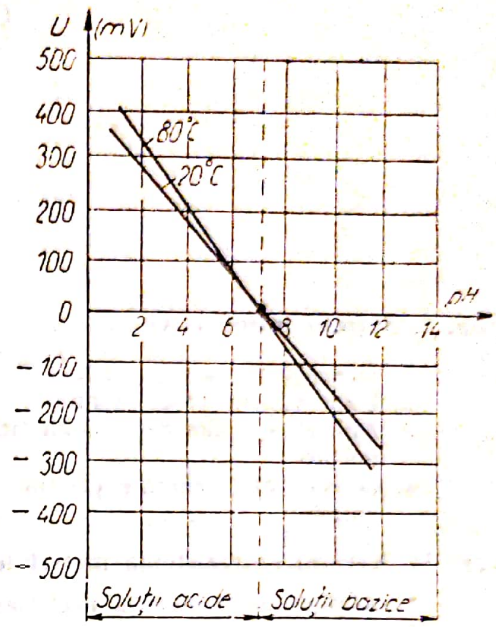


Fig. 289. Dependența dintre t.e.m. măsurate între electrodul de sticlă și cel de calomel și pH, la detectorul W-63.

La ieșirea adaptorului se obține semnalul unificat proporțional cu pH-ul soluției analizate. Acest semnal este transmis unui aparat indicator sau înregistrator din sistemul unificat E.

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

Cap. I. Noţiuni introductive 3

1. Operaţii unitare 3
2. Elemente de calcul tehnic 4
3. Aplicarea legilor de bază ale fizicii şi mecanicii la studiul şi realizarea operaţiilor unitare 8
4. Consideraţii generale privind exploatarea, întreţinerea şi repararea utilajului chimic 12

Cap. II. Noţiuni de rezistenţa materialelor şi organe de maşini 18

1. Noţiuni de rezistenţa materialelor 18
2. Organe de maşini 23

Cap. III. Operaţii mecanice 50

1. Mărunţirea materialelor solide 50
2. Clasarea materialelor solide 59
3. Depozitarea, transportul şi dozarea materialelor solide granulare şi pulverulente 62

Cap. IV. Operaţii hidrodinamice. 68

1. Curgerea fluidelor 68
2. Transportul fluidelor 82
3. Separarea sistemelor eterogene 102
4. Amestecarea materialelor 124

Cap. V. Operaţii termice 129

1. Transmiterea căldurii în utilajele industriei chimice şi petrochimice 129
2. Evaporarea şi condensarea 149
3. Răcirea la temperaturi joase 160

Cap. VI. Operaţii de difuziune 165

1. Bazele transferului de masă 165
2. Distilarea şi rectificarea 170
3. Absorbţia 189
4. Extracţia 199
5. Fluidizarea 207
6. Cristalizarea şi sublimarea 210
7. Adsorbţia 214
8. Uscarea 218

Cap. VII. Aparate de măsurat şi de control 228

A. Măsurarea şi controlul mărimilor fizice 228
1. Scopul măsurării şi a controlului mărimilor în industria chimică 228
2. Organizarea şi dotarea laboratorului de AMC 230
B. Măsurarea unei mărimi fizice. Unităţi de măsură 230
1. Mărimi fizice 230
2. Metode şi mijloace de măsurare 233
3. Clasa de precizie 235
C. Măsurarea mărimilor mecanice 236
1. Măsurarea maselor 236
2. Măsurarea densităţii 238
3. Măsurarea viscozităţii 242

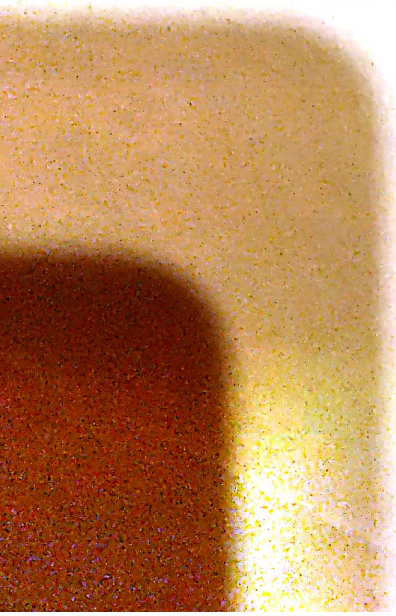
Scanned with OKEN Scanner

D. Măsurarea mărimilor electrice și magnetice 245
1. Clasificarea aparatelor de măsurat electrice 245
2. Măsurarea curenților și a tensiunilor 247
3. Măsurarea puterilor 255
4. Măsurarea rezistențelor 257
5. Măsurarea mărimilor magnetice 263
6. Măsuri de protecție a muncii 264
E. Măsurarea presiunii, a debitului și a nivelului 266
1. Măsurarea presiunii 266
2. Măsurarea debitului 273
3. Măsurarea nivelului 280
F. Măsurarea mărimilor termice și termochimice 283
1. Măsurarea temperaturii 283
2. Măsurarea compoziției amestecurilor de gaze și lichide 290
3. Măsurarea umidității gazelor 292
4. Măsurarea *p*H-ului. 294

Scanned with OKEN Scanner

Tiraj: 8 200. S.P.: 50 broșat. Coli de tipar: 18,75. Hîrtie: Scris I. A 70×100/63 gr. Format: 16/70×100. Bun de tipar: 01. 04. 1977. Nr. Plan: 11376. Ediția: 1977.

Tiparul executat sub comanda nr. 427,
la Întreprinderea poligrafică „Crișana", Oradea
str. Moscovei nr. 5.
Republica Socialistă România



Scanned with OKEN Scanner